

Nuutti Vuorimies, Pauli Kolisoja

Sitomattomien väylärakennemateriaalien kosteustilaherkkyden vähentäminen uusilla käsittelyaineilla

Tiivistelmäraportti

Tiehallinnon selvityksiä 19/2009

Nuutti Vuorimies ja Pauli Kolisoja

Sitomattomien väylärakennemateriaalien kosteustilaherkkyyden vähentäminen uusilla käsittelyaineilla

Tiivistelmäraportti

Tiehallinnon selvityksiä 19/2009

Tiehallinto

Helsinki 2009

Kannen kuva: Nuutti Vuorimies

Verkkojulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/julkaisut)

ISSN 1459-1553

ISBN 978-952-221-213-9

TIEH 3201133-v

TIEHALLINTO

Keskushallinto

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0204 22 11

Vuorimies ja Kolisoja: Sitomattomien väylärakennemateriaalien kosteustilaherkkyyden vähentäminen uusilla käsittelyaineilla. Tiivistelmäraportti. Helsinki 2009. Tiehallinto, Keskushallinto. Tiehallinnon selvityksiä 19/2009, 53 s. + liitt. 1 s. ISSN 1459-1553, ISBN 978-952-221-213-9, TIEH 3201133-v.

Asiasanat: Edullisuusvertailu, kantava kerros, kelirikko, koetiet, kosteuspitaisuus, kulkuskerros, käsittely, laboratoriotutkimukset, rakenteen parantaminen, tutkimus, uusi teknologia, ympäristövaikutukset

Aiheluokka: 32; 53; 70; 38

TIIVISTELMÄ

Väkäste2-projektissa (Väylärakenteiden materiaalien uudet käsittelytekniikat 2) tutkittiin vuosina 2006-2009 aiemmissa projekteissa potentiaalisiksi havaittuja uusia, sitomattomien materiaalien kosteustilaherkkyyden vähentämiseen käytettäviä käsittelyaineita. Uusien käsittelyaineiden ensisijainen käyttökohde arvioitiin olevan tien kantavassa kerroksessa tai soratien kulkuskerroksessa. Tutkimuksen tarkoituksena oli testata uusien käsittelyaineiden käyttökelpoisuus ja kilpailukykyisyys kelirikosta vaurioituvien teiden parantamismenetelmänä sekä luoda ohjeistusta uusien käsittelyaineiden toimivuuden varmistamiseksi kosteustilaherkkien materiaalien ominaisuuksien parantamisessa. Tutkimuksessa käytettiin kahta nestemäistä ja yhtä jauhe- maista uutta käsittelyainetta.

Tutkimuksessa varmistettiin uusien käsittelyaineiden toimivuutta tekemällä syklisiä routanousukokeita ja Tube Suction -kokeita useilla runkomateriaaleilla. Kokeiden perusteella edullisempi Tube Suction -koe indikoi uusilla käsittelyaineilla käsiteltyjen runkomateriaalien kosteustilaherkkyyttä ja myös routanousua. Syklisten routanousukokeiden perusteella 0,8-1,6 % pitoisuuksilla käsittelyaineella B käsiteltyt materiaalit eivät routineet ja käsittelyaineella C käsitellyistä materiaaleista vain yksi routi lievästi. Käsittelyaine A vähensi routanousuja, mutta ei estänyt niitä.

Käsiteltyjen materiaalien mekaanisia ominaisuuksia testattiin laboratorioolosuhteissa syklisellä kolmiaksaalikoelaitteistolla tehdyllä vuodenaikaisvaihtelua simuloivalla kuormitussarjalla ja kulutuskokeilla. Laboratoriokokeissa käsittelyaineet paransivat selkeästi kevätolosuhteita simuloivissa kuormituksissa runkomateriaalien jäykkyyttä ja deformaatioiden vastustuskykyä verrattuna käsittelemättömään materiaaliin. Kulutuskokeilla simuloitiin käsitellyn materiaalin kestävyyttä, jos käsiteltävä kerros jätetään ilman päällystettyä soratien parantamiskohteessa. Kulutuskokeissa käsittelyaine C ja hyvin tiivistettynä käsittelyaine B estivät erittäin hyvin materiaalin irtoamista näytteen pinnalta. Käsittelyaineita A ja B oli käytetty vuonna 2005 rakennetuissa koekohteissa. Koekohteilla vuosina 2006-2008 tehtyjen pudotuspainolaitemittausten takaisinlaskentojen perusteella ei voitu kuitenkaan vielä tässä vaiheessa tehdä yksikäsitteisiä johtopäätöksiä käsittelyaineiden A ja B vaikutuksesta käsitellyn kerroksen ominaisuuksiin. Uusien käsittelyaineiden toimivuudessa on pyritty ensisijaisesti vaurioiden syntymisten estämiseen tierakenteen ollessa heikoimmillaan kelirikkoaikana eikä tavoitteena ole ollut käsitellyn kerroksen jäykkyyden kasvattaminen.

Uusien käsittelyaineiden ympäristökelpoisuutta tutkittiin liukoisuus- ja toksisuuskokeiden perusteella kahdella erilaisella runkomateriaalilla. Seoksista mitatut liuenneet aineet olivat kaukana Vna591/2006 asettamista raja-arvoista lukuun ottamatta käsittelyaineella A käsitellyistä materiaaleista liuennutta fluoridia. Vesikirppu-, valobakteeri- ja levätestin perusteella käsittelyaineella C käsitelty materiaalit eivät olleet akuutisti toksisia. Käsittelyaineella B käsitelty seos aiheutti lievää haittaa vesikirppujen liikuntakyvyille.

Käsittelyaine A sekoitettuna molempiin runkoaineisiin oli vesikirppu- ja levätestien perusteella akuutisti toksista.

Elinkaarianalyysissä vertailtiin uusien käsittelyaineiden kilpailukykyä soratien ja päällystetyn tien rakenteenparantamisvaihtoehtona tyypillisimpiin käytössä oleviin ratkaisuihin verrattuna. Soratiekohteen jäädessä päällystämättä tierakenteen yläosan käsittely käsittelyaineella B tai C havaittiin erittäin kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi. Päällystettävissä rakenteen parantamiskohteissa käsittelyaineet B ja C havaittiin myös kilpailukykyisiksi vaihtoehdoiksi.

Tutkimuksissa todettiin käsittelyaineella B tehtävän rakenteen parantamisen olevan erittäin käyttökelpoinen ja kilpailukykyinen menetelmä. Käsittelyaineen C havaittiin myös olevan käyttökelpoinen ja kilpailukykyinen laboratoriotutkimusten perusteella. Käsittelyaine A ei kuitenkaan sovellu päällystämättömän tien rakenteen parantamismenetelmäksi.

Nuutti Vuorimies and Pauli Kolisoja : Sitomattomien väylärakennemateriaalien kosteustilaherkkyyden vähentäminen uusilla käsittelyaineilla. Tiivistelmäraportti (Reducing moisture susceptibility of unbound road materials using non-traditional treatment agents. Summary report) Helsinki 2007. Finnish Road Administration, Central Administration. Finnra reports, 53 p. + app. 1 p. ISSN 1459-1553, ISBN 978-952-221-213-9, TIEH 3201133-v.

Keywords: Economic efficiency comparison, base course, spring thaw weakening, test roads, moisture content, wearing course, treatment, laboratory testing, rehabilitation, research, new technology, environmental effects

SUMMARY

In the Väkäste2 project (New material treatment technologies of road structures 2) realized in 2006-2009 new (non-traditional) treatment agents which have been found to be potential for reducing the moisture susceptibility of unbound aggregates in previous projects were studied. Based on experience, it was anticipated that the potential applications of new treatment agents are primary in the base course or the wearing course of a gravel road. The purpose of this research was to test the usability and competitiveness of the new treatment agents used as a rehabilitation method for roads suffering from frost heave damages during thawing periods and to create guidelines for ensuring the functionality of the new treatment agents in improvement of the properties of moisture susceptible aggregates. In the research two fluids and one powdery treatment agent was used.

The functionality of the new treatment agents was ensured by performing Tube Suction test and cyclic frost heave test with several aggregates. On the basis of the test results, the low-cost Tube Suction test indicates reliably the moisture susceptibility and the frost heave of aggregates treated with the examined new treatment agents. According to the cyclic frost heave test results, using the ration of 0.8-1.6 % of the treatment agent B prevented frost heaves and, correspondingly, the treatment agent C prevented frost heaves, except one aggregate. The treatment agent A reduced frost heaves but did not prevent them.

The mechanical behaviour of the treated aggregates was tested in the laboratory conditions with the abrasion test and the load series of cyclic triaxial test apparatus that simulates seasonal variations. In the laboratory tests, the treatment agents improved the stiffness and the deformation resistance of the aggregates compared with the untreated aggregates during the load series which simulate spring conditions after thawing. The abrasion test was used to simulate the wearing resistance of the unpaved treated layer at the rehabilitation site of a gravel road. The treatment agent C and the treatment agent B in a well-compacted specimen prevented very well the ravelling of material from the surface of the specimen in the abrasion test.

The treatment agents A and B were used in the full scale test sites constructed in 2005. Falling weight deflection measurements were done on the tests sites during the years 2006-2008. Based on the back calculations of the measurements it's not possible to draw any unambiguous conclusions from the effect of treatment agents A and B to the properties of the treated layers. The function of the new treatment agents has been primarily focused on prevention of damages when the road structure is at its weakest during frost thawing periods and therefore the target has not been the increasing of the stiffness of the treated layer.

The environment competency of the new treatment agents was studied with two different aggregates on the basis of the leaching tests and toxicity tests. Except the leaching fluoride from the aggregates treated with treatment agent A, the released quantities of components analysed from the eluates were far below the limit values presented in the Finnish National Decree for utilisation (VNa 591/2006). On the basis of the water flea, luminescent bacteria and algae tests, elutes from the aggregates treated with treatment agent C were not acutely toxic for aquatic environment. Treatment agent B with the aggregates caused a slight drawback to the water fleas' mobilization. Both aggregates treated with treatment agent A were acutely toxic according to the water flea and algae tests.

In the life cycle analysis, the competitiveness of the new treatment agents was assessed by comparing this alternative rehabilitation method of the gravel road and the paved road with the most typically used methods. On an unpaved gravel road, the treatment of the top of the road structure with treatment agent B or C was found to be an extremely competitive alternative. The treatment agents B and C were found to be a competitive alternative also in the paved roads in rehabilitation projects.

According to the findings of this research, the improvement of the road structure with treatment agent B is an extremely beneficial and competitive method. Also, the treatment agent C was proved to be useful and competitive on the basis of the laboratory tests. However, the treatment agent A is not suitable for a rehabilitation method of the unpaved road structure.

ESIPUHE

Tampereen teknillisen yliopiston Väylärakenteiden materiaalien uudet käsittelytekniikat2 -projekti (Väkäste2) oli pääosin Tekesin rahoittama tutkimushanke. Tekesin lisäksi projektia rahoittivat Skanska Asfaltti Oy, Destia Oy ja Andament Oy sekä Hämeen, Vaasan ja Lapin tiepiirit.

Projektin päätutkijana on toiminut Nuutti Vuorimies ja vastuullisena johtajana prof. Pauli Kolisoja TTY:n Pohja- ja maarakenteiden yksiköstä. Annele Matintupa on vastannut pääosin routanousu- ja Tube Suction -kokeiden teosta, joista hän teki diplomityönsä projektin yhteydessä. Riitta Syvälä on vastannut pääosin ympäristövaikutusosion liukoisuuskokeista ja näytteiden lähettämisestä analysoitavaksi. Samalla Syvälä teki diplomityönsä uusien käsittelyaineiden ympäristövaikutuksista. Antti Kalliainen teki sykliset kolmiakseliaalikoeket ja takaisinlaskennat pudotuspainolaitemittausten tuloksista. Kalliainen teki projektin yhteydessä diplomityönsä uusien käsittelyaineiden vaikutuksesta materiaalien mekaaniseen käyttäytymiseen.

Projektin johtoryhmän työskentelyyn ja mielenkiintoisiin keskusteluihin osallistuivat pääasiallisesti seuraavat henkilöt:

Timo Saarenketo, puheenjohtaja	Roadscanners Oy
Ilkka Jussila	Tekes
Hannu Peltoniemi	Destia Oy
Jukka Ahonen ja Seppo Kemppainen	Skanska Asfaltti Oy
Antti Nissinen ja Matti Juola	Andament Oy
Arvo Lähde ja Markku Rintamäki	Vaasan tiepiiri
Anne Valkonen	Hämeen tiepiiri
Taina Rantanen	Sito Oy
Kari Kuusipuro	Nordkalk Oyj
Jouko Ristilä ja Päivi Mannila	Kemira Oyj
Mari Niinikoski ja Aki Laine	Ciba Finland Oy
Pauli Kolisoja	TTY, Maa- ja pohjarakenteet
Annele Matintupa,	TTY / Roadscanners Oy
Riitta Syvälä ja Antti Kalliainen	TTY, Maa- ja pohjarakenteet
Nuutti Vuorimies, siht.	TTY, Maa- ja pohjarakenteet

Tutkimusta rahoittaneita tahoja ja projektin johtoryhmätyöskentelyyn osallistuneita henkilöitä kiitämme lämpimästi mielenkiintoisen ja haastavan projektin mahdollistamisesta. Harjakoelaitteiston tekemisestä kiitämme yli-ins. Kauko Sahia. Laboratoriomestari Marko Happoa kiitämme huolella ja hyvin tehdystä työstä projektin tehtävissä. Yliassistentti Minna Leppästä (TTY) ja TkT Katja Vaajasaarta (Golder Associates Oy) kiitämme erittäin arvokkaasta panoksesta uusien käsittelyaineiden ympäristövaikutusasioissa. Erikseen kiitämme Timo Saarenketoa hyvistä kommentteista ja innostavasta asenteesta tutkimustyöhön ja Osmo Rasimusta paneutumisestaan tutkimushankkeen alkuun saattamiseksi.

Tampere lokakuu 2009

Hämeen tiepiiri

Sisältö

TIIVISTELMÄ	3
SUMMARY	5
ESIPUHE	7
1 JOHDANTO	11
2 VÄKÄSTE2-TUTKIMUKSEN RAKENNE JA TUTKITUT KÄSITTELYAINEET	12
2.1 Väkäste2-tutkimuksen rakenne	12
2.2 Tutkimuksessa käytetyt uudet käsittelyaineet	12
3 MERKITTÄVIMMÄT TUTKIMUSTULOKSET	14
3.1 Routanousu- ja Tube Suction -kokeet	14
3.1.1 Tutkimusmenetelmät	14
3.1.2 Syklisten routanousukokeiden tulokset	15
3.1.3 Tube Suction -kokeiden tulokset	18
3.1.4 Routanousu- ja Tube Suction -kokeen yhteys	22
3.1.5 Yhteenveto routaosion koetuloksista	23
3.2 Ympäristövaikutukset	23
3.2.1 Ympäristökelpoisuuden tutkimustapa	23
3.2.2 Liukoisuustestit	25
3.2.3 Suodosten pääasialliset analyysimenetelmät	25
3.2.4 Ympäristökelpoisuuskokeiden tulokset	26
3.2.5 Yhteenveto ympäristövaikutuksista	29
3.3 Mekaaniset ominaisuudet mitoitusta varten	30
3.3.1 Vuodenaikaisvaihtelua simuloivat sykliset kolmiaksaalikokeet	30
3.3.2 Kulutuskokeet	33
3.3.3 Vuonna 2005 tehtyjen koekohteiden seuranta	35
3.3.4 Yhteenveto mekaanisten ominaisuuksien tuloksista	43
3.4 LOUKO-KOURA -KOEKOHDE	43
4 ELINKAARIANALYYSI	46
4.1 Soratiet	46
4.2 Päälystettävät tiet	47
5 OHJEISTUS UUSIEN KÄSITTELYAINEIDEN KÄYTTÖÖN OTTAMISEEN	49
6 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT	51
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	53

10 Sitomattomien väylärakennemateriaalien kosteustilaherkkyyden vähentäminen
uusilla käsittelyaineilla. Tiivistelmäraportti

8	VIITTEET	54
9	LIITTEET	56

1 JOHDANTO

Väylärakenteiden parantamisen yhteydessä tehtävät materiaali- ja työtekni-set ratkaisut vaikuttavat suuresti korjauksen kustannuksiin ja luonnonvarojen käyttöön. Raaka-aineiden nopeampi kallistuminen suhteessa tienpidon määrärahojen nousuun on johtanut käytettävissä olevalla rahalla korjattavien tiepituuksien pienenemiseen. Lisäksi kasvaneen liikenteen kuormitus vaurioittaa tierakenteita nopeutuvalla tahdilla. Ilmaston lämpeneminen, erityisesti eteläisessä Suomessa, on johtanut viime vuosina sateiden ja routasykliin lisääntymiseen talvella, mikä on vähentänyt tierakenteiden kuormituskestävyyttä. Lisäksi teollisuuden ja kaupan tarve saada kuljetukset oikeaan paikkaan oikeaan aikaan on kasvanut ja lisännyt painetta tieverkon kunnon laadulle sekä korjausten kohdentamiseen painorajoitusten poistamiseksi. Tarve edullisten ja kestävien rakenteiden parantamisvaihtoehtojen käyttöönotolle on lisääntynyt erityisesti alempiluokkaisilla teillä.

Väylärakenteiden materiaalit ovat alttiina vuodenaikojen vaihteluille. Suomessa roudan sulamisella on suuri vaikutus rakenteiden käyttäytymiseen, mutta runsassateiset ajanjaksot saattavat myös johtaa ongelmiin. Rakenteisiin sopivia materiaalia ei voida valita pelkästään rakeisuuskäyrän perusteella, vaan monet muut tekijät vaikuttavat materiaalien soveltuvuuteen tierakenteissa. Materiaalien koostumuksen ja ominaisuuksien merkitys on kasvanut jouduttaessa käyttämään enemmän murskattuja materiaaleja ja soveltuvien materiaalien etäisyyksien kasvaessa käyttökohteista. Murskaus ja pitkät kuljetusmatkat lisäävät uudella materiaalilla tehtävien korjausten kustannuksia. Mikäli tiessä oleva materiaali voidaan hyödyntää, säästetään lisäksi arvokkaita luonnonvaroja. Yksi potentiaalinen vaihtoehto kosteustilaherkkien materiaalien kosteusongelmien ratkaisemiseksi on vaikuttanut olevan ongelmallisen materiaalin käsittely pienellä määrällä lisäainetta, joka estäisi veden kulkeutumista käsiteltyssä materiaalissa.

TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä on tien rakennekerrosmateriaalien kosteustilaherkkyyden vaikutusta materiaalien vuodenaikaiskäyttäytymiseen tutkittu 1990-luvun loppupuolelta alkaen. 2000-luvun alkupuolella tehtiin ensimmäiset yksittäiset kokeilut uudentyyppisillä materiaalien kosteustilaherkkyyttä vähentävillä käsittelyaineilla. Kokeilut johtivat noin vuoden mittaiseen pääosin Tekesin rahoittamaan strategiseen perustutkimushankkeeseen (Väkäste), jonka tarkoituksena oli kerätä maailmalta saatavissa olevaa keskeistä tietoutta uusista käsittelyaineista ja tutkia saatavilla olevia uusia käsittelyaineita laboratoriokokeilla. 2000-luvun puolivälissä uusien käsittelyaineiden tutkimuksia jatkettiin pienemmässä mittakaavassa osana mm. Tiehallinnon S14-projektia koekohteiden rakentamisella ja pääosin EU:n rahoittamissa Roadex-projekteissa.

Tämän vuonna 2006 alkaneen pääosin Tekesin rahoittaman tutkimuksen tarkoituksena on ollut varmistaa aiemmissa tutkimuksissa potentiaalisiksi havaittujen uusien käsittelyaineiden käyttökelpoisuus laboratoriokokeilla, koekohteiden seurannalla ja elinkaarianalyysillä. Samalla on ollut tarkoituksena luoda ohjeistusta uusien käsittelyaineiden käyttöön ottamisen helpottamiseksi.

2 VÄKÄSTE2-TUTKIMUKSEN RAKENNE JA TUTKITUT KÄSITTELYAINEET

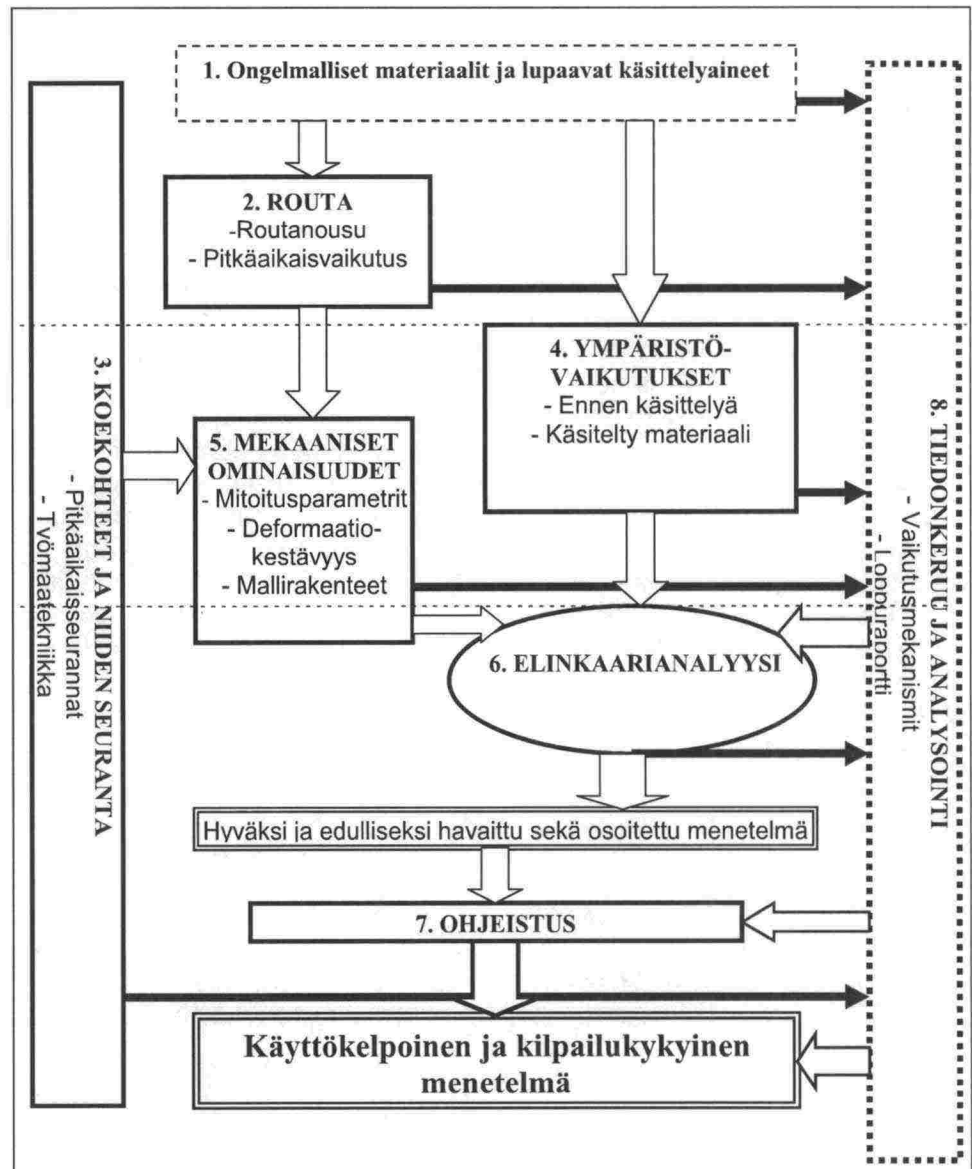
2.1 Väkäste2-tutkimuksen rakenne

Väkäste2-tutkimusprojekti suunniteltiin koostuvaksi kahdeksasta osiosta, joista osa toteutettiin pääosiltaan intensiivisinä lyhyehköinä jaksoina. Osan osioista oli ajateltu kestävän koko tutkimuksen ajan. Kuvassa 1 on esitetty nämä projektin alussa suunnitellut osiot ja niiden asemoituminen tutkimuksen etenemisessä. Ensimmäinen osio (Ongelmalliset materiaalit ja lupaavat käsittelyaineet) oli pääosin tutkimuksen alkaessa jo olemassa olevan tiedon hyödyntämistä ja sen täydentämistä. Ensimmäinen osio toimi pohjana seuraaville osioille. Kokeiden määrän ja koetulosten merkityksen kannalta tutkimuksessa oli kolme selkeästi muita suurempaa osiota. Nämä kolme osiota olivat uusien käsittelyaineiden vaikutus routimiseen (2.) ja mekaanisiin ominaisuuksiin (5.) sekä uusien käsittelyaineiden ympäristövaikutusten arvioiminen (4.). Näistä kolmesta intensiivisestä jaksosta tehtiin diplomityöt. Koko tutkimuksen ajan seurattiin ja dokumentoitiin koekohteiden tapahtumia (3.) sekä koottiin ja arvioitiin käytettyjen uusien käsittelyaineiden vaikutuksia ja kerättiin tietoutta uusista käsittelyaineista ja kosteustilaherkistä materiaaleista (8). Elinkaarianalyysi osiossa (6.) vertailtiin kertyneen tiedon perusteella uusilla käsittelyaineilla tehtäviä rakenteen parantamisratkaisuja tavanomaisesti vastaavissa kohteissa käytettäviin rakenteen parantamismenetelmiin. Ohjeistuksessa (7.) kirjoitettiin kokemukset sellaiseen muotoon, että sen avulla on selkeämpää testata uusia käsittelyaineita ja tukea niiden mahdollista laajempaa käyttöönottamista. Kuvassa 1 näkyvät kaksi katkoviivaa kuvaavat projektissa vaiheita, jolloin tutkimustulosten perusteella arvioitiin tutkimusten jatkamis- tai suuntaamistarvetta siihen mennessä kertyneiden tietojen perusteella.

2.2 Tutkimuksessa käytetyt uudet käsittelyaineet

Väkäste2-tutkimuksessa keskityttiin tutkimusprojektin alussa valittuihin kolmeen potentiaalisimmaksi arvioituun uuteen käsittelyaineeseen. Näistä käsittelyaineista oli saatu kokemusta aiemmassa Väkäste-tutkimusprojektissa (Vuorimies ja Kolisoja 2005). Väkäste2-tutkimusprojektin kaikissa vaiheissa ja raporteissa käsittelyaineista on käytetty nimikkeitä käsittelyaine A, B ja C. Käsittelyaineiden oikeat nimet on esitetty yleensä erikseen raporttien ja julkaisujen liitteissä.

Käsittelyaine A on kuiva, jauhemainen käsittelyaine, jonka vaikuttavin aine on polymeeripinnoitettu lentotuhka. Polymeerisessä käsittelyaineessa A on kaksi osaa polymeereillä peitettyä lentotuhkaa ja yksi osa sammutettua kalkkia. Käsittelyainetta A laitetaan tavallisesti 1,5 % käsiteltävän maa-aineksen massasta. Polymeerit kiinnittyvät hienoaineksen pintaan syrjäyttäen siihen kiinnittyneitä vesimolekyylejä ja muodostavat kivien väliin hydrofobisen maamatriisin, joka estää veden kulkua käsiteltyyn materiaaliin. Suomessa tuotetta kokeiltiin vuonna 2005 kahdessa tielle (Roadscanners Oy ja TTY 2005) ja kahdessa kadulle tehdyssä koerakenteessa.



Kuva 1 Kaaviokuva Väkäste2-tutkimusprojektin suunnittelusta etenemisestä.

Käsittelyaine B on nestemäinen hartsipohjainen kationinen hajaantuva tuote. Se on tarkoitettu paperin pohjustamiseen ja pinnan hydrofobisoimiseen. Kuiva-aineen osuus aineessa on 34-36 % ja sen happamuus on 2-5. Suomessa tuotetta kokeiltiin kahdessa vuonna 2005 rakennetussa koerakenteessa (Roadscanners Oy ja TTY 2005).

Käsittelyaine C on nestemäinen anioninen styreeniakrylaattipolymeeri. Se on hydrofobinen pintaliima, jota käytetään parantamaan paperin hydrofobisia ominaisuuksia.

3 MERKITTÄVIMMÄT TUTKIMUSTULOKSET

3.1 Routanousu- ja Tube Suction -kokeet

3.1.1 Tutkimusmenetelmät

Tube Suction (TS) -kokeen on erinomainen ja edullinen tutkimusmenetelmä erottamaan kosteustilaherkkyyden suhteen erilaiset tien rakennekerrosten materiaalit toisistaan. Etsittäessä Väkäste-projektissa uusia käsittelyaineita kosteustilaherkkyydestä eli kelirikoista kärsivien tierakenteiden materiaalien parantamiseen havaittiin käsiteltyjenkin materiaalien TS-kokeiden indikoivan käsittelyaineen vaikutusta materiaalin kosteustilaherkkyyteen (Vuorimies ja Kolisoja 2005). Routanousukokeiden keskeisenä tarkoituksena oli varmistaa, että TS-kokeella toimivaksi havaitulla käsittelyaineella käsiteltyyn materiaaliin ei muodostu routanousua useammankaan jäätymis-sulamissyklin jälkeen. Samalla oli tarkoitusta saada aineistoa siitä, kuinka hyvin TS-koe indikoi syklisen routanousukokeen tuloksia ja kuinka luotettavasti TS-kokeen perusteella voi arvioida käsitellyn materiaalin toimivuutta.

Tube Suction -kokeet tehtiin noudattaen Timo Saarenkedon julkaisussa (2000) esittämää tapaa muutamien poikkeuksin, jotka on esitetty tarkemmin Timo Raitasen (2005) ja Annele Matintuvan (2007) diplomitoissa. TS-kokeessa kuivatettu koekappale asetetaan pohjastaan 10-15 mm syvyyteen tislattuun veteen. Näytteen yläpinnasta mitataan tietyin aikavälein dielektrisyys ja sähköjohtavuutta. Kun dielektrisyys indikoi vapaan veden määrää, niin näytteestä mitatusta dielektrisyyskuvaajasta nähdään miten nopeasti ja kuinka paljon vapaata vettä kertyy näytteen yläosaan. Taulukossa 1 on esitetty TS-kokeeseen perustuva kantavan kerroksen sitomattomien murskeiden laatuluokitus, jossa dielektrisyysarvoa yhdeksän on käytetty ensisijaisena rajana Suomessa.

Taulukko 1 Sitomattomien murskeiden arviointi laatuluokkiin TS-kokeiden dielektrisyysarvon perusteella (Saarenketo 2000).

TS-kokeen dielektrisyysarvo	Luokitus
< 10 ¹⁾	Hyvänlaatuinen kantavan kerroksen murske
10 – 16	Kyseenalainen kantavan kerroksen murske
> 16	Sopimaton kantavan kerroksen murskeeksi

¹⁾ Suomessa TS-kokeen dielektrisyysarvoa 9 on myös käytetty hyvälaatuisiksi luokiteltavan murskeen rajana.

Routanousukoetta varten koekappaleet tehtiin samalla tavalla kuin TS-koekappaleet kahta pientä muutosta lukuun ottamatta. Routanousukoekappaleet sullottiin viiteen osaan katkaistuihin muotteihin yhtenäisen muotin sijasta ja routanousukoekappaleet tiivistettiin 180 mm korkuisiksi. Ennen routanousukoetta koekappaleille tehtiin TS-koe, jonka jälkeen koekappaleet asetettiin routanousukoeelaitteistoon. Syklisessä routanousukokeessa koekappaleille tehtiin 3-4 vuorokauden jäädytysyksi ja sen jälkeen näytteen annettiin sulaa vajaa vuorokausi. Syklinen routanousukoe on esitetty tarkemmin Anneli Matintuvan (2007) diplomityössä.

Routanousukokeesta pystytään esittämään esimerkiksi näytteiden routanousu, routan syvyys, routanoususuhte ja routanousunopeus ajan suhteen. Kuvaajista voidaan määrittää myös eri syklien routimiskertoimet ja segregaatipotentiaalit. ISSMFE:n asettamat segregaatipotentiaalin raja-arvot on esitetty taulukossa 2.

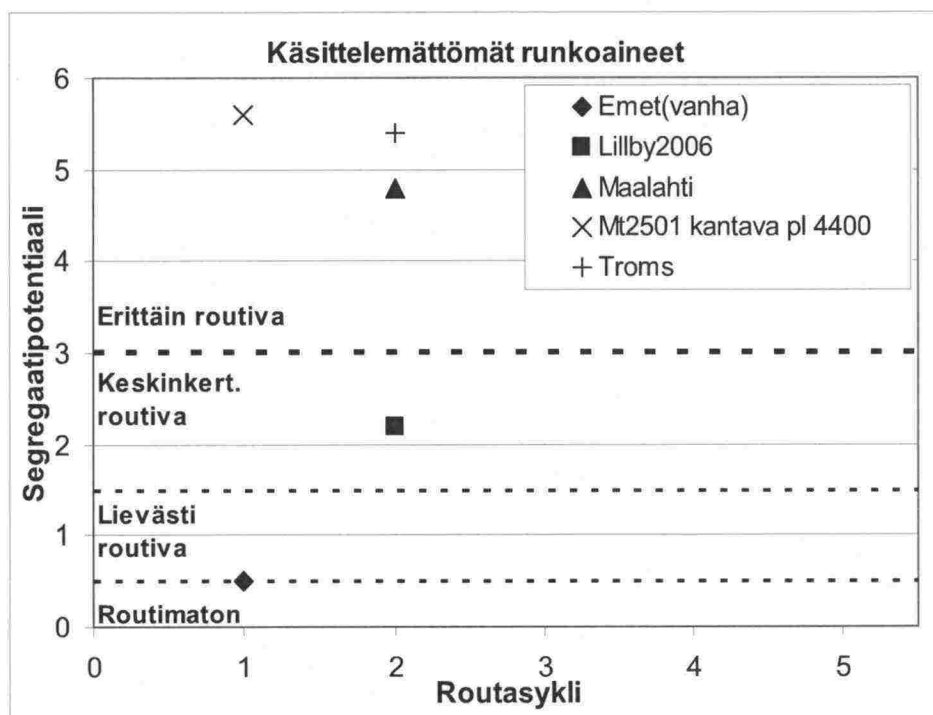
Taulukko 2 ISSMFE:n segregaatipotentiaalin raja-arvot materiaalien luokittelemiseksi (ISSMFE 1989)

Routivuus	Segregaatiopotentiaali
Routimaton	<0,5
Lievästi routiva	0,5-1,5
Keskinkertaisesti routiva	1,5-3,0
Erittäin routiva	>3,0

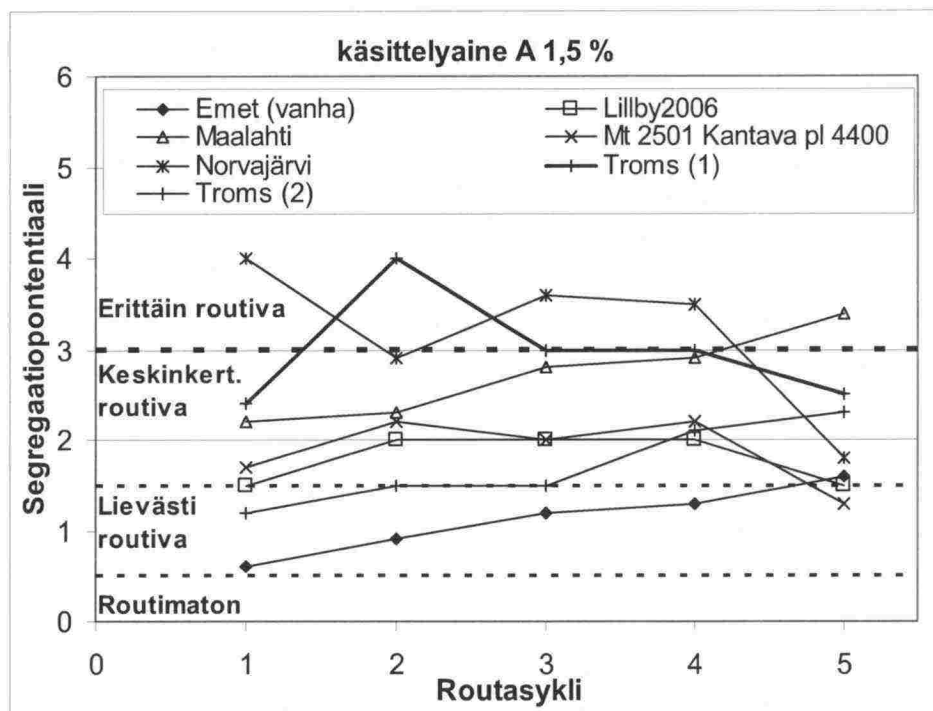
3.1.2 Syklisten routanousukokeiden tulokset

Viiden runkoaineen segregaatipotentiaalit oli tarkoitus määrittää yhden jäädytyslamissyklin perusteella, koska odotettavissa olevat routanousut käsittelemättömillä materiaaleilla voisivat ylittää routanousuja mittavan anturin mitta-alueen. Tromsan, Lillby2006 ja Maalahden materiaaleille tehtiin toinen jäädytys sykli, koska ensimmäinen jäädytys sykli keskeytyi tekniseen vikaan ja sen mittausdata ei ollut riittävän vertailukelpoinen muiden näytteiden ensimmäisen jäädytys syklin routanousujen kanssa. Kuvassa 2 on esitetty runkoaineiden segregaatipotentiaalit routanousukokeiden perusteella. Segregaatiopotentiaaliin perustuvat raja-arvot on merkitty kuvaajaan katkoviivoilla. Kuvasta nähdään runkomateriaalien routivuuksien vaihtelevan lievän ja routimattoman rajalta erittäin routiviin materiaaleihin.

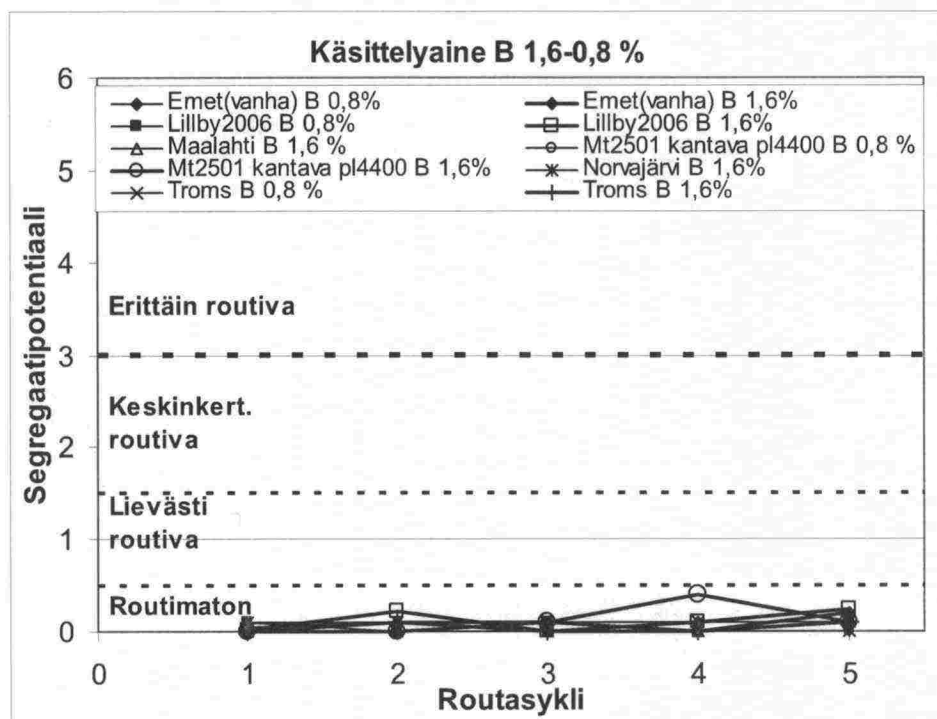
Kuvissa 3-5 on esitetty käsittelyaineilla A, B ja C käsitellyillä runkomateriaaleilla tehdyistä syklisistä routanousukokeista määritetyt segregaatipotentiaalit. Kuvasta 3 nähdään, että käsittelyaine A 1,5 % pitoisuudella ei vähentänyt riittävästi runkomateriaalien routanousuja vaan käsittelyaineella A käsitelty runkomateriaalit olivat edelleen routivia. Kuvasta 4 nähdään, että 0,8-1,6 % pitoisuudella käsittelyaine B teki koekappaleista routimattomia. Kuvasta 5 nähdään, että 0,8-1,6 % pitoisuudella myös käsittelyaine C teki koekappaleista routimattomia lukuun ottamatta Tromsan runkomateriaalilla 0,8 % käsittelyainepitoisuudella tehtyä koekappaletta. Käsittelyaineella C käsitellyjen Tromsan materiaalin neljänsien jäädytys syklien segregaatipotentiaaleja ei pystytty määrittämään, koska kesken jäädytys syklin lämpötilat kohosivat liian korkeiksi teknisten ongelmien vuoksi. Kuvien 4 ja 5 perusteella käsittelyaineet B ja C 0,8-1,6% pitoisuuksilla estävät erittäin hyvin routanousujen muodostumista.



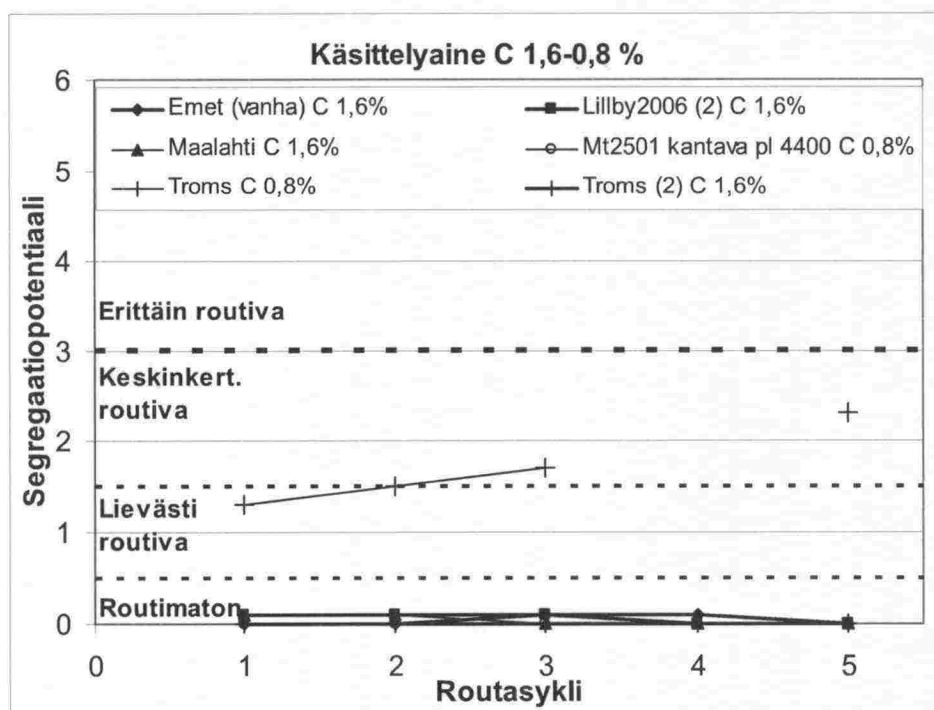
Kuva 2 Routanousukokeista määritetyt runkomateriaalien segregaatiopotentiaalit ja segregaatiopotentiaaliin perustuvat routivuudet.



Kuva 3 Käsittelyaineella A 1,5 % pitoisuudella käsiteltyjen runkomateriaalien routanousukokeista määritetyt segregaatiopotentiaalit ja segregaatiopotentiaaliin perustuvat routivuudet.



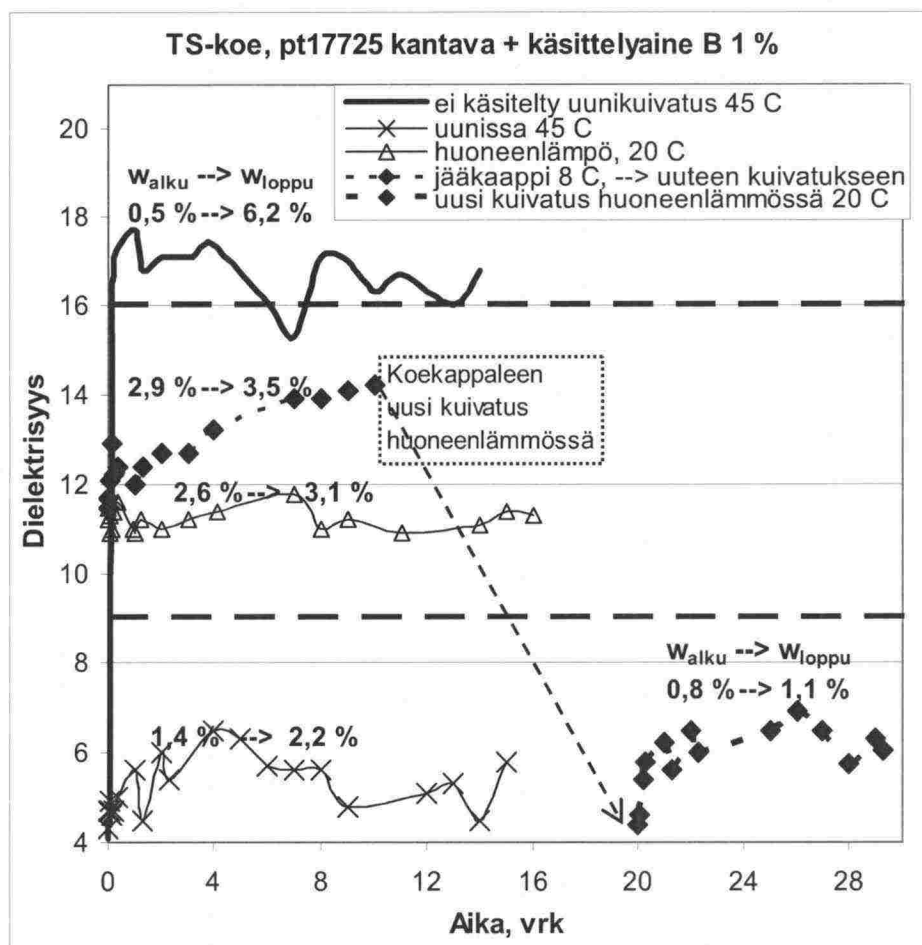
Kuva 4 Käsittelyaineella B 0,8- 1,6 % pitoisuudella käsitellyjen runkomateriaalien routanousukokeista määritetyt segregaatiopotentiaalit ja segregaatiopotentiaaliin perustuvat routivuudet.



Kuva 5 Käsittelyaineella C 0,8-1,6 % pitoisuudella käsitellyjen runkomateriaalien routanousukokeista määritetyt segregaatiopotentiaalit ja segregaatiopotentiaaliin perustuvat routivuudet.

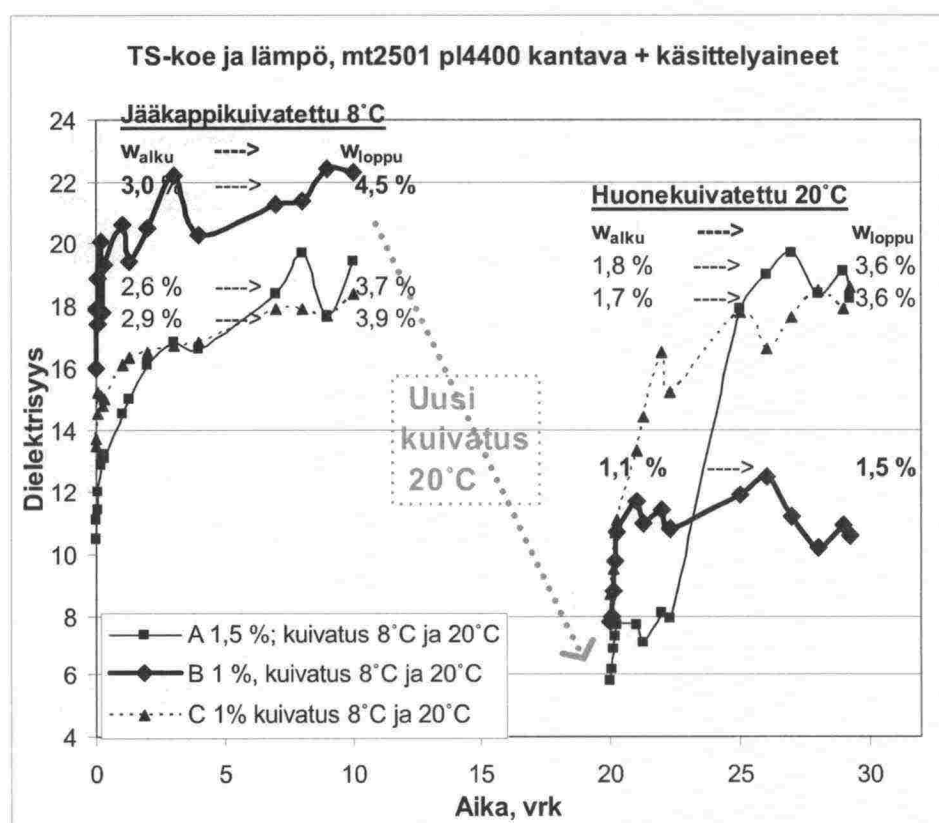
3.1.3 Tube Suction -kokeiden tulokset

Tutkimusprojektissa tutkittiin käsittelyn jälkeisen lämpötilan vaikutuksia TS-kokeiden tuloksiin. Kuvassa 6 on esitetty käsittelyaineella B käsitellyille pt17725 kantavan kerroksen materiaalilla tehtyjen modifioitujen TS-kokeiden ja käsittelemättömälle materiaalille tehdyn TS-kokeen dielektrisyys-kuvaajat. Erona kokeissa on koekappaleiden säilytyslämpötila ennen varsinaisia dielektrisyys ja sähkönjohtavuusmittauksia. Kuvasta nähdään, että 6-8 °C lämpötilassa käsittelyaine ei ole ehtinyt tehoamaan ja dielektrisyysarvo kasvaa hitaasti. Kun saman koekappale annettiin mittauksen jälkeen olla huoneen lämmössä kaksi viikkoa ja TS-kokeen mittaukset aloitettiin uudestaan, niin mittaus tulokset vastasivat normaalin TS-kokeen ohjeen mukana tehdyn koekappaleen tuloksia. Yksi TS-koe tehtiin myös pelkästään huoneenlämmössä säilytetylle koekappaleelle, jossa dielektrisyysarvo oli 11 koko kahden viikon mittausjakson ajan. Kyseisessä kokeessa käsittelyaine B esti kuitenkin veden imeytymisen näytteeseen.



Kuva 6 Käsittelyaineella B käsitellyllä pt17725 kantavan kerroksen materiaalilla tehtyjen TS-kokeiden dielektrisyyskuvaajat. Dielektrisyyskuvaajan yläpuolella on esitetty koekappaleen laskennallinen vesipitoisuus kokeen alussa ja lopussa.

Käsittelyaineilla A, B ja C käsitellyille Mt2501 to 4 pl 4400 kantavan kerroksen materiaaleille tehtiin TS-kokeet, joissa koekappale tiivistämisen jälkeen laitettiin jääkaappiin noin 6-8 °C lämpötilaan 40 °C asteisen uunikuivatuksen sijasta ennen varsinaisten mittausten tekemistä. Kymmenen vuorokautta mittausten aloittamisen jälkeen mittaukset lopetettiin ja koekappaleet siirrettiin huoneen lämpöön kuivahtamaan noin kymmeneksi vuorokaudeksi, jonka jälkeen TS-kokeen mittaukset toistettiin. Kuvasta 7 nähdään, että käsittelyaineella B käsitellyn näytteen dielektrisyysarvot laskivat alemmalle tasolle. Tämä indikoi, että käsittelyaine B tehoaa pidemmänkin ajan kuluttua, kunhan materiaali kuivuu riittävästi. Käsittelyaineilla A ja C mitatut dielektrisyysarvot nousivat huoneenlämmössä säilyttämisen jälkeen tehdyissä mittauksissa samalle tasolle kuin mitä oli mitattu jääkaapissa säilyttämisen jälkeen.



Kuva 7 Käsittelyaineilla A, B ja C käsitellyllä mt2501 to 4 pl 4400 kantavan kerroksen materiaalilla tehtyjen modifioitujen TS-kokeiden dielektrisyyskuvaaja. Ensimmäisessä vaiheessa koekappaleita on kuivatettu jääkaapissa ennen TS-koea, jonka jälkeen toisessa vaiheessa samoja koekappaleita on kuivatettu huoneenlämmössä ennen TS-kokeen uusimista. Dielektrisyyskuvaajan yläpuolella on esitetty koekappaleen laskennallinen vesipitoisuus dielektrisyysmittauksen alussa ja lopussa.

Taulukossa 3 on esitetty samalla massalla tehtyjen peräkkäisten tiivistysten vaikutusta käsittelyaineilla käsitellyn materiaalien tiivistettävyyteen parantetulla Proctor-sullonnalla ja TS-koenäytteiden teossa käytetyllä kiertotiivistimellä (ICT). Mt2501 to 4 pl 4550 kohdasta otettua kulutuskerrosta ja kantavaa kerrosta käytettiin kokeissa runkoaineina. Käsittelyaine mod B on käsittelyaine B ilman isotiatsolia. Tiivistyksessä materiaalien laskennallinen vesi-

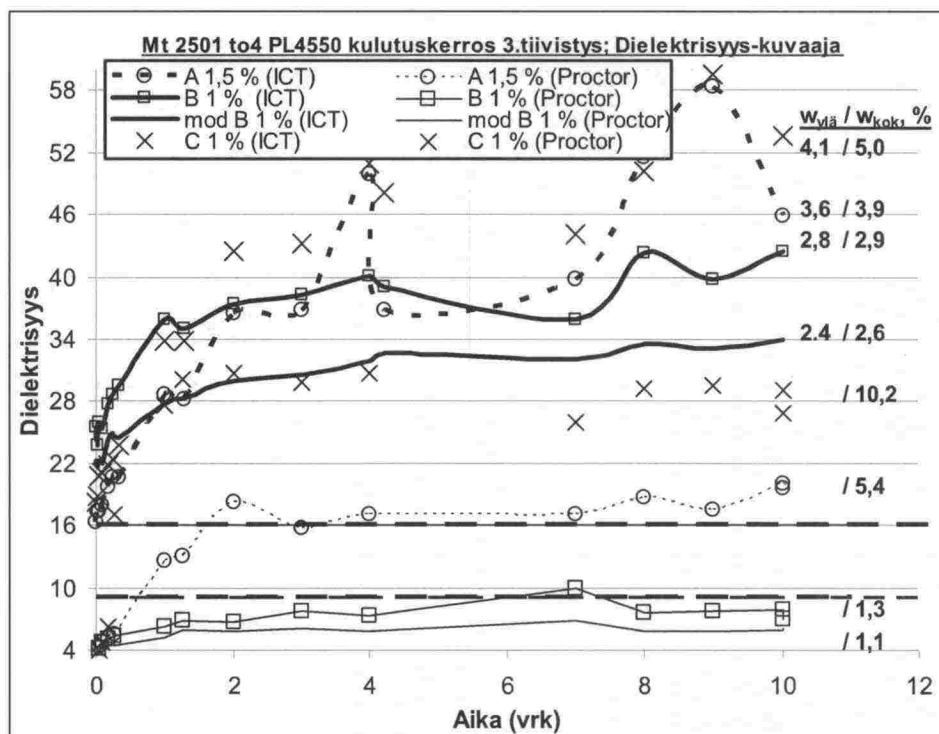
pitoisuus oli 4,5 %. Ennen uutta tiivistystä koekappaleet hajotettiin. Jokaisen tiivistyksen jälkeen koekappaleiden annettiin kuivua huoneenlämmössä 2 - 4 viikkoa, jolloin ensimmäisen tiivistyksestä oli kulunut 1,5 kuukautta tehtäessä kolmatta tiivistystä. Käsittelyaineella A käsitelty materiaalit eivät tiivistyneet yhtä hyvin kuin muilla käsittelyaineilla käsitellyt materiaalit. Tiivistystavalla ja uudelleen tiivistämisellä ei ollut selkeää vaikutusta käsittelyaineella A käsitellyissä materiaaleissa. Käsittelyaineilla B, mod B ja C tiivistyminen oli keskenään samanlaista. Käsittelyaineilla B, mod B ja C käsitelty materiaali tiivistyi hieman paremmin kiertotiivistimessä sekä yleensä ensimmäinen tiivistyskerta tuotti hieman suuremman tiiviyn kuin kaksi seuraavaa tiivistämistä.

Taulukko 3 Käsittelyaineilla A, B, mod B ja C käsiteltyjen mt2501 to 4 pl4550 kantavan kerroksen ja kulutuskerroksen materiaalien uudelleen tiivistyskokeiden kuivairtoteiheydet parannetulla Proctor-sullonnalla ja kiertotiivistimellä (ICT).

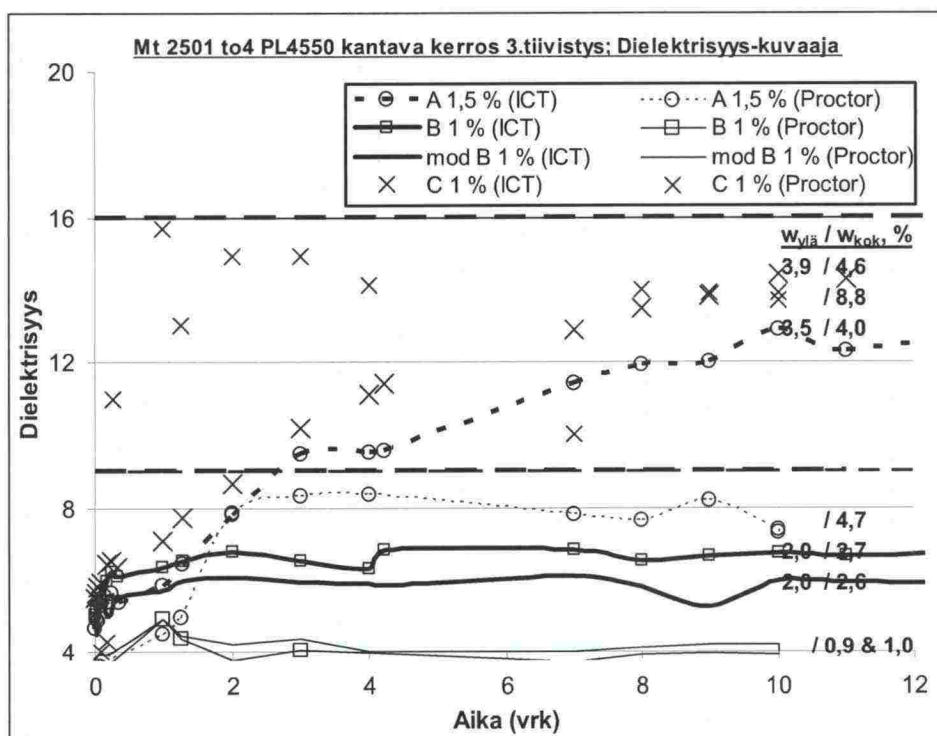
Runko- materiaali	Tiivistys- tapa	Käsittely- aine	Kuivairtoteiveys, kg/m ³		
			1. sullonta	2. sullonta	3. sullonta
mt2501 to4 pl4550 kantava kerros	Proctor	A 1,5 %	2202	2199	2214
		B 1 %	2279	2265	2249
		mod B 1 %	2257	2260	2240
		C 1 %	2252	2218	2214
	ICT	A 1,5 %	2187	2192	2234
		B 1 %	2289	2269	2296
		mod B 1 %	2313	2285	2310
		C 1 %	2315	2277	2329
mt2501 to4 pl4550 kulutus- kerros	Proctor	A 1,5 %	2273	2233	2253
		B 1 %	2321	2276	2296
		mod B 1 %	2319	2280	2280
		C 1 %	2322	2276	2288
	ICT	A 1,5 %	2220	2186	2257
		B 1 %	2348	2321	2340
		mod B 1 %	2349	2318	2321
		C 1 %	2362	2312	2331

Kolmannen tiivistyksen jälkeen kiertotiivistimellä tiivistettyjä koekappaleita käsiteltiin kuten TS-koekappaleita. Proctor-sullonnalla tiivistettyjä koekappaleita käsiteltiin TS-koekappaleiden tapaisesti antaen niiden kuitenkin kuivah-taa huoneen lämmössä, koska niissä ei ollut suojaputkea koekappaleen reunaa vasten. Kuvissa 8 ja 9 on esitetty kolmannen tiivistyksen jälkeen TS-kokeen tapaan mitatut dielektrisyys-kuvaajat sekä kokeen lopussa koekap-paleista mitatut koekappaleen yläosan ($w_{ylä}$) ja koko koekappaleen (w_{kok}) ve-sipitoisuudet. Kiertotiivistimellä (ICT) tiivistettyjen koekappaleiden laskennal-liset vesipitoisuudet kokeen alussa olivat 2,4-2,7 % kulutuskerroksen materi-aalilla ja 2,1-2,2 % kantavan kerroksen materiaalilla. Kuvista nähdään käsi-telyaineen B estäneen edelleen erinomaisesti veden imeytymistä näytteisiin. Käsittelyaineet A ja C eivät kolmannen tiivistämisen jälkeen vähentäneet riit-tävästi runkomateriaalien kosteustilaherkkyyttä. Mt2501 to4 kohdasta pl 4400 otetulla kantavan kerroksen materiaalilla oli aiemmin tehty käsittelyai-neilla A, B ja C TS-kokeet, joissa käsittelyaineilla A ja B saadut koetulokset

vastasivat kolmannen kiertotiivistimellä tehdyn tiivistyksen jälkeen saatuja koetuloksia, mutta käsittelyaineella C saadut koetulokset olivat radikaalisti huonommat. Vaikuttaisikin siltä, että käsittelyaineilla A ja B käsitellyt materiaaleja voisi tiivistää uudelleen ja käsittelyaineiden vaikutus olisi vielä samankaltainen kuin ensimmäisellä tiivistyskerralla. Kokeiden perusteella modifioitu käsittelyaine B eli mod B näyttäisi toimivan yhtä tehokkaasti kuin käsittelyaine B.



Kuva 8 Käsittelyaineilla A, B, mod B ja C käsitellyillä mt2501 to4 pl4550 kulutuskerroksen materiaaleilla kolmannen tiivistyksen jälkeen koekappaleiden yläpinnalta TS-kokeen tapaan mitatut dielektrisyysarvot. (ICT) vastaa näytteen tekotavan ja koon puolesta normaalia TS-koekappaletta. Oikealla reunassa kokeen jälkeen määritetyt vesipitoisuudet.

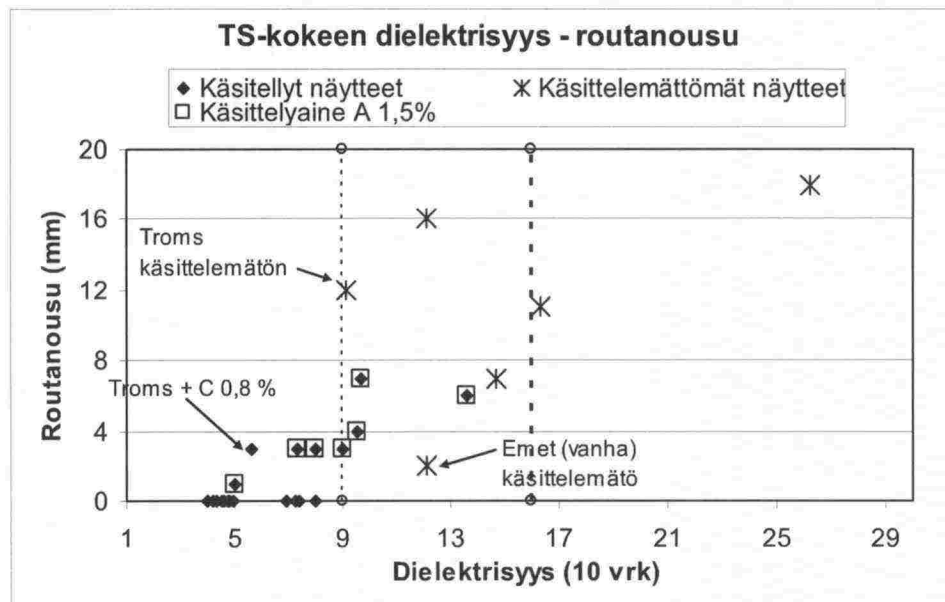


Kuva 9 Käsittelyaineilla A, B, mod B ja C käsitellyillä mt2501 to pl4550 kantavan kerroksen materiaaleilla kolmannen tiivistyksen jälkeen koekappaleiden yläpinnalta TS-kokeen tapaan mitatut dielektrisyysarvot. (ICT)-merkitty näyte vastaa näytteen tekotavan ja koon puolesta normaalia TS-koekappaleita. Oikealla reunassa kokeen jälkeen määritetyt vesipitoisuudet.

3.1.4 Routanousu- ja Tube Suction -kokeen yhteys

Kuvassa 10 on esitetty käsittelemättömistä ja käsittelyaineilla B ja C 0,8-1,6 % pitoisuudella sekä käsittelyaineella A 1,5 % pitoisuudella käsiteltyjen koekappaleiden routanousukokeista määritetyt routanousut verrattuna samasta koekappaleesta TS-kokeessa 10 vrk:n kohdalla määritettyihin dielektrisyysarvoihin. Kuvasta nähdään, että kaikissa käsittelemättömissä koekappaleissa dielektrisyysarvo oli yli arvon yhdeksän ja että niihin muodostui routanousua.

Kuvassa 10 on neliöllä korostettuna käsittelyaineella A käsiteltyjen näytteiden tulokset. Käsittelyaineella A käsiteltyjen koekappaleiden dielektrisyysarvolla ja routanousulla näyttäisi olevan selkeä trendi ja dielektrisyysarvon ollessa arvoa 8 - 9 suurempi koekappaleisiin muodostui routanousua. Samasta kuvasta nähdään käsittelyaineilla B ja C käsiteltyjen koekappaleiden routanousujen oleva nolla ja dielektrisyysarvojen olevan arvoa yhdeksän pienempi. Poikkeuksen teki käsittelyaineella C 0,8 % pitoisuudella käsitelty Tromsan runkomateriaali. Pääsääntöisesti TS-kokeeseen perustuva dielektrisyysraja joudutaan varmentamaan jokaiselle uudelle käsittelyaineelle erikseen, mikäli pelkästään TS-koetta käytetään kriteerinä arvioitaessa uuden käsittelyaineen vaikutusta kosteustilaherkkyyden pienentymiseen.



Kuva 10 Käsittelemättömien ja käsittelyaineilla B ja C 0,8-1,6 % pitoisuudella sekä käsittelyaineella A 1,5 % pitoisuudella käsiteltyjen materiaalien routanousukokeista määritetyt routanousut verrattuna samasta koekappaleesta TS-kokeessa 10 vrk:n kohdalla määritettyihin dielektrisyysarvoihin.

3.1.5 Yhteenveto routaosion koetuloksista

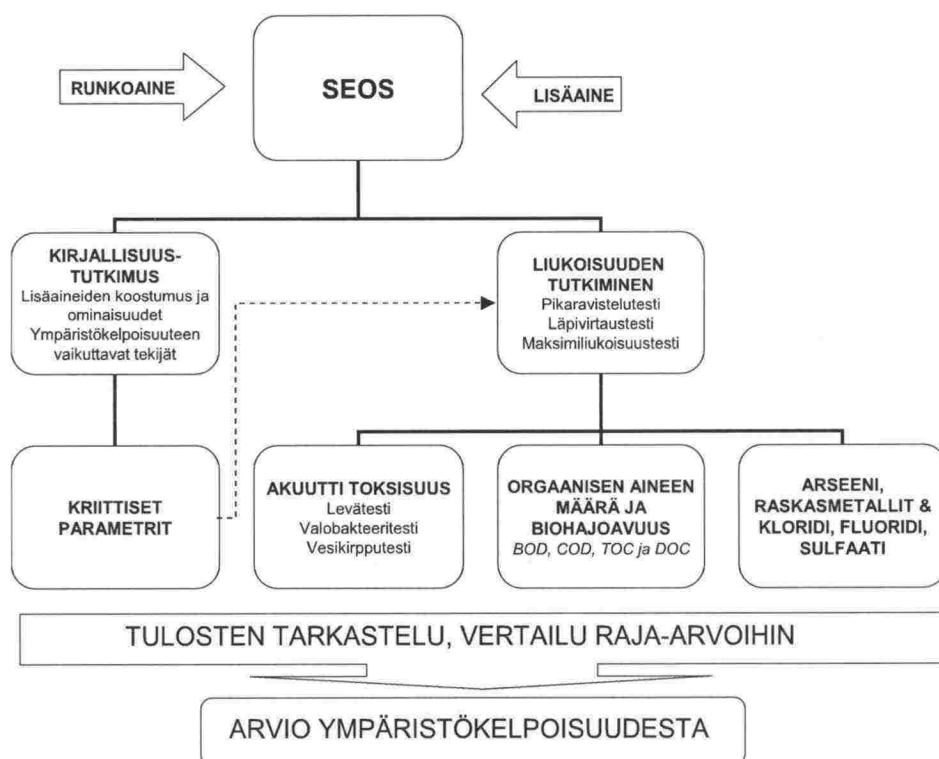
Syklisten routanousukokeiden perusteella käsittelyaine B 0,8-1,6 % pitoisuuksilla esti routanousut testatuissa runkomateriaaleissa. Käsittelyaine C 0,8-1,6 % pitoisuuksilla esti myös routanousut testatuissa runkomateriaaleissa lukuun ottamatta Tromsan runkomateriaalia. Käsittelyaine A 1,5 % pitoisuudella vähensi routimista, mutta ei riittävän paljon, jotta sen käyttöä voisi suositella routanousukokeiden perusteella Suomen olosuhteita vastaavassa ilmastossa. Routanousukokeiden perusteella käsittelyaineet B ja C olivat erittäin lupaavia sitomattomien materiaalien kosteustilahrkkyden vähentämisessä.

3.2 Ympäristövaikutukset

3.2.1 Ympäristökelpoisuuden tutkimustapa

Ympäristövaikutusosiossa tutkittiin uusien käsittelyaineiden ja niiden yhdisteiden mahdollisia haittavaikutuksia ihmiselle ja ympäristölle. Erityisesti pyrittiin löytämään sopivia menetelmiä ja kriteerejä uusien käsittelyaineiden ympäristökelpoisuuden arviointiin. Kuvassa 11 on esitetty periaatteellisenä kaaviona miten Väkäste2-tutkimusprojektissa arvioitiin kahteen runkoaineeseen sekoitettujen käsittelyaineiden A, B ja C ympäristökelpoisuutta. Tutkittavana olleiden käsittelyaineiden ympäristövaikutuksia selvitettiin ensin käsittelyaineiden käyttöturvallisuustiedotteen ja kirjallisuuden perusteella. Näiden perusteella suunniteltiin tehtävät kokeet ja kokeiden suodoksista tehtävät analyysit. Kokeellisessa osassa tutkittiin käsittelyaineiden ja runkomateriaalien seoksista liukenevia ainesosia läpivirtaus-, pikaravistelu- ja maksimiliukoi-

suustesteillä. Samat kokeet tehtiin aina myös käsittelemättömällä runkomateriaalilla. Suodoksista määritettiin metallien pitoisuuksien lisäksi kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet, joita voitiin verrata Suomen lainsäädännössä annettuihin liukoisuuteen perustuviin raja-arvoihin (Vna 591/2006). Läpivirtaustestien suodoksista tutkittiin myös biologisesti ja kemiallisesti (BOD ja COD) hajoavan aineksen määrää sekä akuuttia toksisuutta vesikirppu-, valobakteeri- ja levätesteillä. Käsitellyissä runkomateriaaleissa oli 1,5-1,6 % käsittelyainepitoisuus. Yksityiskohtaisempi kuvaus kappaleessa 3.2 esitettävistä asioista on Riitta Syvälän (2007) diplomityössä.



Kuva 11 Ympäristökelpoisuuden arviointi käsittelyaineilla A, B ja C Väkäste2-projektin ympäristövaikutusosiossa (Syvälä 2007)

Kirjallisuuden ja käyttöturvallisuustiedotteiden mukaan käsittelyaine A on polymeeripinnoitettua lentotuhkaa, johon on lisätty sammutettua kalkkia. Sammutettu kalkki ei ole vaarallista, mutta polymeeripinnoitetusta lentotuhkasta ei ollut taustatietoja käytettävissä. (Syvälä 2007)

Käyttöturvallisuustiedotteen mukaan käsittelyaine B sisältää kahta eri kolofonia sekä erittäin pienen määrän kahden isotiatsolin seosta. Kolofonit eivät ole kirjallisuuden perusteella helposti hajoavia ja ovat kohtalaisen kertyviä. Kolofonit eivät ole veteen liukenevia ja eivät ole akuutisti toksisia. Käsittelyaineen sisältämä isotiatsolin seos on nopeasti hajoava ja se ei ole kertyvä. Isotiatsolin seos liukenee kuitenkin hyvin veteen ja luokitellaan erittäin myrkylliseksi. (Syvälä 2007)

Käyttöturvallisuustiedotteen mukaan käsittelyaine C sisältää erittäin vähän (<100 ppm) n-Butyyliakrylaattia, joka on melko huonosti hajoava. N-Butyyliakrylaattia ei ole kertyvää ja se liukenee hyvin veteen sekä on ympäristölle myrkyllistä. (Syvälä 2007)

3.2.2 Liukoisuustestit

Väkäste2 -projektissa liukoisuutta tutkittiin läpivirtaus- ja pikaravistelutesteillä sekä maksimiliukoisuustestillä. Liukoisuustestien tarkoituksena oli selvittää kuinka paljon käsittelystä materiaalista irtoaa eli liukenee mahdollisia haitta-aineita testimateriaaliin kosketuksessa olevaan veteen. Eri liukoisuustesteistä saatuja suodoksia tutkittiin erilaisilla analyysimenetelmillä.

Läpivirtaustesti tehtiin soveltaen standardia CEN/TS 14405 (2004). Kuukauden kestäneissä läpivirtaustesteissä pumpattiin vettä pienellä nopeudella käsittelyaineen ja runkomateriaalin seoksella täytettyjen 300 mm korkeiden kolonnien läpi. Läpi suotautuneesta vedestä valmistettiin näytteet metallien ja suolojen pitoisuusmäärittäykseen, orgaanisen aineen määrän ja biohajoavuuden tutkimiseen sekä toksisuustesteihin. (Syvälä 2007)

Läpivirtaustesteille tehtiin vertailuna pikaravistelutestit Lillby2006-runkomateriaalilla sekä siihen sekoitetuilla käsittelyaineilla A ja B. Pikaravistelutesti tehtiin standardin SFS-12457-3 mukaisesti. Pikaravistelutesti kestää kaksi vuorokautta, ja siksi haluttiin tutkia, voisiko kuukauden kestävä läpivirtaustestin korvata nopeammin suoritettavalla testillä. Pikaravistelutestin suodoksista valmistettiin näytteet metallien ja suolojen pitoisuusmäärittäystä varten. (Syvälä 2007)

Maksimiliukoisuustestillä tutkittiin happamuuden vaikutusta ainesosien liukoisuuteen. Maksimipitoisuustestillä saadaan selville materiaalista liukenevat aineet hyvin pitkällä aikavälillä tai materiaalin mahdollinen hajoaminen tai hapettuminen luonnossa. Maksimipitoisuustesti tehtiin soveltaen hollantilaisesta standardiluonnosta NEN 7341. Testi on suhteellisen nopea. Maksimiliukoisuustestin suodoksista valmistettiin näytteet metallien ja suolojen pitoisuusmäärittäystä varten. Maksimiliukoisuuskokeet tehtiin Lillby2006-runkoaineella sekä siihen sekoitetuilla käsittelyaineilla A ja B. (Syvälä 2007)

3.2.3 Suodosten pääasialliset analyysimenetelmät

Metallianalyysit sekä sulfaatti-, fluoridi- ja kloridipitoisuudet määritettiin Labtium Oy:n laboratoriossa. Metallimääritykset tehtiin ICP-MS ja ICP-AES -tekniikalla ja anionien määrittäminen tehtiin IC-tekniikalla. (Syvälä 2007)

Toksisuuskokeina tehtiin Pirkanmaan ympäristökeskuksen laboratoriossa valobakteerikoe standardin SFS-EN-ISO 11348-3 mukaisesti, vesikirpun akuutti myrkyllisyystesti standardin ISO 6431 mukaisesti ja levän kasvun estymistesti standardin SFS-EN 28692 mukaisesti. (Syvälä 2007)

3.2.4 Ympäristökelpoisuuskokeiden tulokset

Taulukoissa 4 ja 5 on vertailtu läpivirtaustestien suodoksista määritetyt metallien pitoisuudet sekä kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet runkoaineittain. Taulukoihin on merkitty alleviivauksella ne runkomateriaalin ja käsittelyaineen seoksesta liuenneiden ainesosien määrät, jotka ovat pienempiä kuin vastaavat runkomateriaalin arvot ja lihavoinnilla ne runkomateriaalin ja käsittelyaineen seoksesta liuenneiden ainesosien määrät, jotka ovat suurempia kuin vastaavat runkomateriaalin arvot. Samaa suuruusluokkaa oleviksi on luokiteltu kaikki ne arvot, jotka ovat 0,5-1,5 -kertaiset runkomateriaalin arvoon verrattuna. Lisäksi taulukossa on esitetty Valtioneuvoston asetuksessa 591/2006 annetut liukoisuuteen perustuvat raja-arvot betonimurskeen ja tuhkan käytölle peitettyssä rakenteessa sekä Suomen ympäristökeskuksen teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämiselle esittämät liukoisuuskriteerit. Mikäli jokin arvo on ollut raja-arvoa suurempi, niin kyseisen kohdan ruutu on tummennettu taulukossa. (Syvälä 2007)

Taulukoista 4 ja 5 nähdään, että tutkituista materiaaleista liuenneiden aineiden määrät olivat erittäin pieniä. Ainoastaan runkomateriaalien ja käsittelyaineen A seoksista liuenneen fluoridin määrä ylitti VNa:ssa 591/2006 esitetyn raja-arvon. Taulukoista voidaan myös havaita, että käsittelyaineen A ja runkomateriaalien seoksista liukeni pääsääntöisesti hieman enemmän ainesosia kuin muista seoksista ja itse runkoaineesta. Pääsääntöisesti käsittelyaineesta A enemmän liuenneet aineet, kuten molybdeeni, kloridi ja sulfaatti ovat lentotuhkan tavallisesti sisältämiä haitta-aineita. (Syvälä 2007)

Taulukossa 6 on esitetty läpivirtaustesteistä saaduille suodoksille tehtyjen toksisuustestien tulokset. Tulokset on ilmoitettu EC₅₀%-arvoina, joka tarkoittaa näytelaimennosta, jossa testattavat eliöt saavat 50 % haitan tai estymisen kontrolliliuokseen verrattuna. Tuloksien perusteella Lillbyn ja Mt2501 runkomateriaaleista veteen liuenneet aineet eivät aiheuta akuuttia toksisuutta. Käsittelyaineella C käsiteltyjen runkoaineiden suodokset eivät olleet myöskään akuutisti toksisia. Valobakteeritestin perusteella käsittelyaineet eivät olleet akuutisti toksisia. (Syvälä 2007)

Valobakteeri- ja levätestin perusteella runkomateriaaleihin sekoitettuna käsittelyaineesta B liuenneet ainesosat eivät ole akuutisti toksisia, mutta käsittelyaineen B ja runkomateriaalien seoksen suodos aiheutti lievää toksisuutta vesikirpussa. Käsittelyaineen A ja runkomateriaalien seoksesta liukenevat aineet sisältävät ympäristölle myrkyllisiä ainesosia vesikirppu- ja levätestin perusteella. (Syvälä 2007)

Maksimiliukoisuustesteissä ja pikaravistelutesteissä Lillby2006-runkoaineesta sekä siihen sekoitetuista käsittelyaineista A ja B liuenneiden aineiden määrät olivat selkeästi alle taulukoissa 3 ja 4 esitettyjen raja-arvojen. Pikaravistelutesti on mekaanisesti rajumpi testi kuin läpivirtaustesti ja siksi pikaravistelutestissä liuenneiden aineiden määrät ovat yleensä isompia kuin läpivirtaustestissä. Toteutetuissa pikaravistelu- ja läpivirtaustesteissä poikkeuksena havaittiin Lillby2006-kalliomurskeen ja käsittelyaineen A sekoitus, josta oli liennut pääsääntöisesti enemmän aineita läpivirtaustestissä kuin pikaravistelutestissä. (Syvälä 2007)

Taulukko 4 Runkomateriaalista Mt2501 liuenneiden ainemäärien vertailu runkomateriaalin ja käsittelyaineiden seoksesta liuenneisiin ainemääriin (mg/kg) sekä Vna 591/2006 raja-arvot betonimurskeen hyötykäytölle ja SYKEN raja-arvot teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämiselle (Sorvari, 2000). Paksunnoksella kirjoitetut arvot ovat suurempia ja alleviivatut arvot ovat pienempiä kuin vastaavat runkomateriaalin arvot. Tumma ruutu tarkoittaa raja-arvon ylitystä (mr = alle laboratorion määritysrajan).

	Runkomateriaali Mt2501		Käsittelyaine A		Käsittelyaine B		Käsittelyaine C		Vna 591/2006	SYKE ra- ja-arvot
	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10		
Arseeni (As)	0,013	0,090	0,003	0,074	0,005	0,021	0,012	0,062	0,5	0,14
Barium (Ba)	0,01	0,04	0,02	0,05	0,03	0,07	0,02	0,04	20	10
Kadmium (Cd)	mr	mr	0,00005	0,00005	mr	mr	0,00008	0,00008	0,04	0,011
Koboltti (Co)	0,0001	0,0013	0,0073	0,0149	0,0002	0,0006	0,0006	0,0011		1,1
kromi (Cr)	mr	0,002	0,03	0,054	mr	mr	mr	mr	0,5	2,0
Kupari (Cu)	0,01	0,022	0,08	0,157	0,01	0,020	0,01	0,022	2,0	1,1
Molybdeeni(Mo)	0,007	0,011	0,042	0,068	0,006	0,009	0,012	0,026	0,5	0,31
Nikkeli (Ni)	0,001	0,003	0,015	0,031	0,001	0,004	0,003	0,006	0,4	1,2
Lyijy (Pb)	0,001	0,005	0,001	0,004	0,001	0,002	0,001	0,003	0,5	1,0
Antimoni (Sb)	0,0004	0,0014	0,0011	0,0040	0,0005	0,0014	0,0004	0,0013	0,06	
Seleen (Se)	mr	mr	0,006	0,014	mr	mr	mr	mr	0,1	0,060
Vanadiini (V)	0,02	0,13	0,08	0,40	0,01	<u>0,03</u>	0,01	0,06		2,2
Sinkki (Zn)	0,006	0,018	0,004	0,011	0,004	0,017	0,006	0,052	4,0	1,5
Kalsium (Ca)	31	90	69	328	90	213	53	133		
Natrium (Na)	11	16	8	18	19	27	14	19		
Kloridi (Cl-)	22	24	52	70	35	38	30	31	800	250
Fluoridi (F-)	1,3	2,7	9,2	10,4	0,9	2,1	0,9	2,1	10	
Sulfaatti (SO4)	10	13	13	34	10	13	<u>1</u>	6	1000	1500

Taulukko 5 Runkomateriaalista Lillby2006 liuenneiden ainemäärien vertailu runko-
materiaalin ja käsittelyaineiden seoksesta liuenneisiin ainemääriin
(mg/kg) sekä Vna 591/2006 raja-arvot betonimurskeen hyötykäytölle ja
SYKE:n raja-arvot teollisuuden sivutuotteiden hyödyntämiselle (Sorvari,
2000). Paksunnoksella kirjoitetut arvot ovat suurempia ja alleviivatut ar-
vot ovat pienempiä kuin vastaavat runkomateriaalin arvot. Tumma ruutu
tarkoittaa raja-arvon ylitystä (mr = alle laboratorion määrittämissä).

	Runkomateriaali		Käsittelyaine A		Käsittelyaine B		Käsittelyaine C		Vna 591/2006	SYKE ra- ja-arvot
	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10	L/S 2	L/S 10		
Arseeni (As)	0,0005	0,0018	0,002	0,0099	0,005	0,0013	0,003	0,0071	0,5	0,14
Barium (Ba)	0,02	0,04	0,74	0,83	0,02	0,03	0,02	0,04	20	10
Kadmium (Cd)	0,002	0,02	<u>0,0005</u>	<u>0,0005</u>	<u>0,0005</u>	0,001	<u>0,0001</u>	0,001	0,04	0,011
Koboltti (Co)	0,08	0,09	<u>0,01</u>	<u>0,01</u>	<u>0,03</u>	0,05	<u>0,02</u>	0,04		1,1
kromi (Cr)	0,001	0,005	0,031	0,054	mr	mr	0,003	0,005	0,5	2,0
Kupari (Cu)	0,01	0,03	0,23	0,27	0,01	0,03	0,01	0,03	2,0	1,1
Molybdeeni (Mo)	0,001	0,002	0,303	0,339	0,002	0,006	0,016	0,033	0,5	0,31
Nikkeli (Ni)	0,11	0,14	0,06	<u>0,06</u>	<u>0,04</u>	0,08	<u>0,03</u>	0,10	0,4	1,2
Lyijy (Pb)	0,002	0,011	0,005	0,009	0,001	0,008	0,003	0,013	0,5	1,0
Antimoni (Sb)	0,0002	0,001	0,003	0,007	0,0002	0,001	0,001	0,003	0,06	
Seleen (Se)	0,001	0,001	0,022	0,043	0,001	0,001	0,005	0,005	0,1	0,060
Vanadiini (V)	0,001	0,006	0,037	0,233	0,0002	<u>0,001</u>	0,004	0,006		2,2
Sinkki (Zn)	0,18	0,26	<u>0,01</u>	<u>0,02</u>	<u>0,05</u>	<u>0,12</u>	<u>0,01</u>	<u>0,08</u>	4,0	1,5
Kalsium (Ca)	48	57	1560	1771	27	40	58	72		
Natrium (Na)	5	8	36	41	12	15	12	17		
Kloridi (Cl-)	3	5	15	18	8	11	13	16	800	250
Fluoridi (F-)	1	3	12	15	1	3	2	3	10	
Sulfaatti (SO4)	159	178	98	239	79	93	<u>93</u>	139	1000	1500

Taulukko 6 Toksisuustestien tulokset (Syvälä 2007).

Näyte	Vesikirppu	Valobakteeri	Levätesti
	EC ₅₀ -arvo%	EC ₅₀ -arvo%	EC ₅₀ -arvo%
Mt2501-runkomateriaali L/S 2	>50	>50	ei myrkyll.
Mt2501+Käsittelyaine A L/S 2	23	>50	5,2
Mt2501+ Käsittelyaine B L/S 2	37	>50	ei myrkyll.
Mt2501+ Käsittelyaine C L/S 2	ei myrkyll.	>50	ei myrkyll.
Mt2501-runkomateriaali L/S 10	ei myrkyll.	>50	ei myrkyll.
Mt2501 + Käsittelyaine A L/S 10	57	>50	23
Mt2501+ Käsittelyaine B L/S 10	23	>50	ei myrkyll.
Mt2501+ Käsittelyaine C L/S 10	ei myrkyll.	>50	ei myrkyll.
Lillby2006-runkomateriaali L/S 2	ei myrkyll.	>50	ei myrkyll.
Lillby2006+ Käsittelyaine A L/S 2	21	>50	8,6
Lillby2006-runkomateriaali L/S 10	ei myrkyll.	>50	ei myrkyll.
Lillby2006+ Käsittelyaine A L/S 10	25	>50	6,6
Lillby2006+ Käsittelyaine B L/S 10	69	>50	ei myrkyll.
Lillby2006+ Käsittelyaine C L/S 10	ei myrkyll.	>50	ei myrkyll.

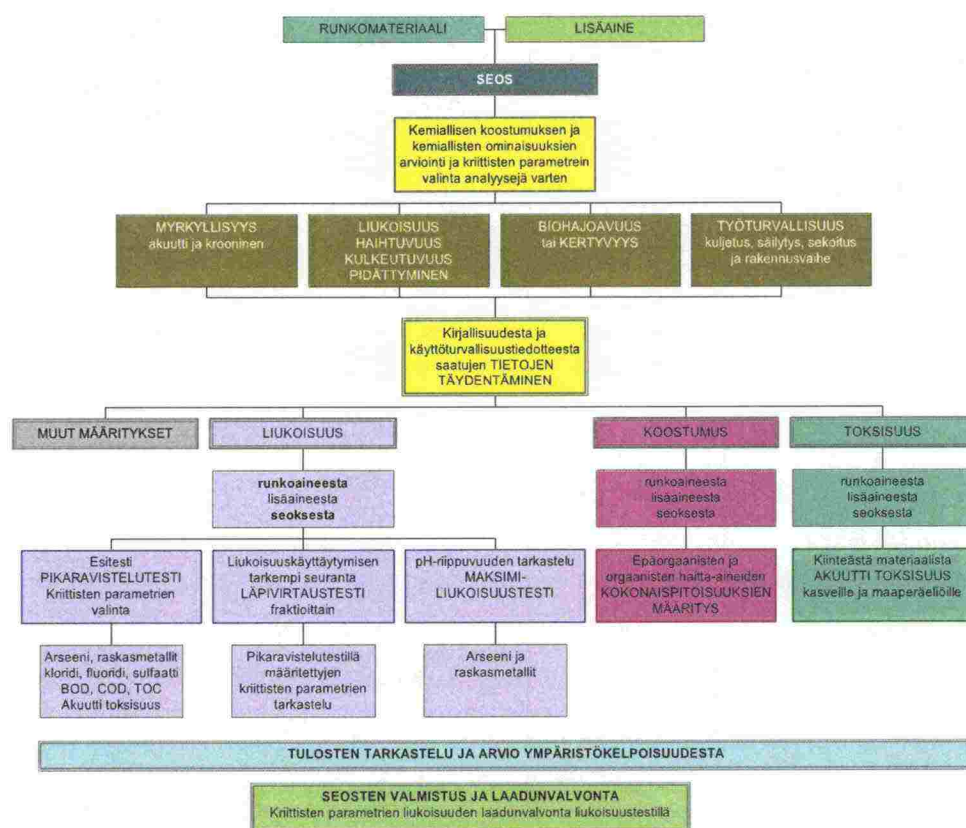
3.2.5 Yhteenveto ympäristövaikutuksista

Yhteistä tehdyille liukoisuustesteille oli, että niillä saatujen liuenneiden aineiden määrät olivat erittäin pieniä ja yhtä poikkeusta lukuun ottamatta selkeästi alle esitettyjen maarakennushyötykäytön raja-arvojen. Läpivirtaustestillä saatujen tulosten perusteella käsittelyaineen A ja tutkittujen runkoaineiden sekoituksesta liukeni läpivirtaustesteissä pääsääntöisesti enemmän aineita kuin muista seoksista. Käsittelyaineen A ja runkomateriaalien seoksesta liukeni fluoridia yli VNa:ssa 591/2006 esitetyn raja-arvon. (Syvälä 2007)

Läpivirtaustestien suodoksista tehtyjen vesikirppu-, valobakteeri- ja levätestin perusteella käsittelyaineen C ja runkomateriaalien seoksista liukenevat aineet eivät ole akuutisti toksisia. Valobakteeri- ja levätestin perusteella runkomateriaalien ja käsittelyaineen B seoksesta ei liukene aineita, jotka aiheuttaisivat akuuttia toksisuutta valobakteerien valontuoton tai levän kasvun estymisen perusteella arvioituna. Käsittelyaineen B ja runkomateriaalien seos saattaa sisältää kuitenkin sellaisia veteen liukenevia aineita, jotka voivat aiheuttaa lievää toksisuutta vesikirppujen liikuntakyvyille. Käsittelyaineen A ja runkomateriaalien seoksesta liukenevat aineet aiheuttivat vesikirppu- ja levätestissä akuuttia toksisuutta. Tulosten perusteella käsittelyaineet B ja C vaikuttavat ympäristölle vaarattomilta. (Syvälä 2007)

Kuvassa 12 on esitetty ehdotus tien rakennusmateriaalien käsittelemiseen käytettävien uusien käsittelyaineiden ympäristökelpoisuuden tutkimiseksi. Syvälään diplomityössä on ehdotettu tien rakennusmateriaalien käsittelemiseen käytettäviä uusia käsittelyaineita tutkittaessa selvittämään kirjallisuuden ja käyttöturvallisuustiedotteiden perusteella tutkittavien käsittelyaineiden kemiallinen koostumus, arvioimaan kemiallisia ominaisuuksia ja valitsemaan

kriittiset parametrit, joiden perusteella käsittelyaineiden ympäristökelpoisuus osoitetaan. Ehdotuksen mukaan käsittelyaineiden liukoisuus, koostumus ja toksisuus tulisi tutkia. Liukoisuutta voidaan tutkia läpivirtaus- ja pikaravistelutestillä. Pikaravistelutesti ehdotetaan tehtäväksi läpivirtaustestin esitestinä, jolloin pikaravistelutestin perusteella voidaan valita ne parametrit, joita tutkitaan paremmin läpivirtaustestillä. Maksimiliukoisuustestiä ehdotetaan käytettäväksi tutkittaessa pH-muutosten vaikutusta arseenin ja raskasmetallien liukoisuuteen. Tulosten perusteella tehdään arvio ympäristökelpoisuudesta. (Syvälä 2007)



Kuva 12 Ehdotus uusien käsittelyaineiden ympäristökelpoisuuden tutkimiseksi (Syvälä 2007)

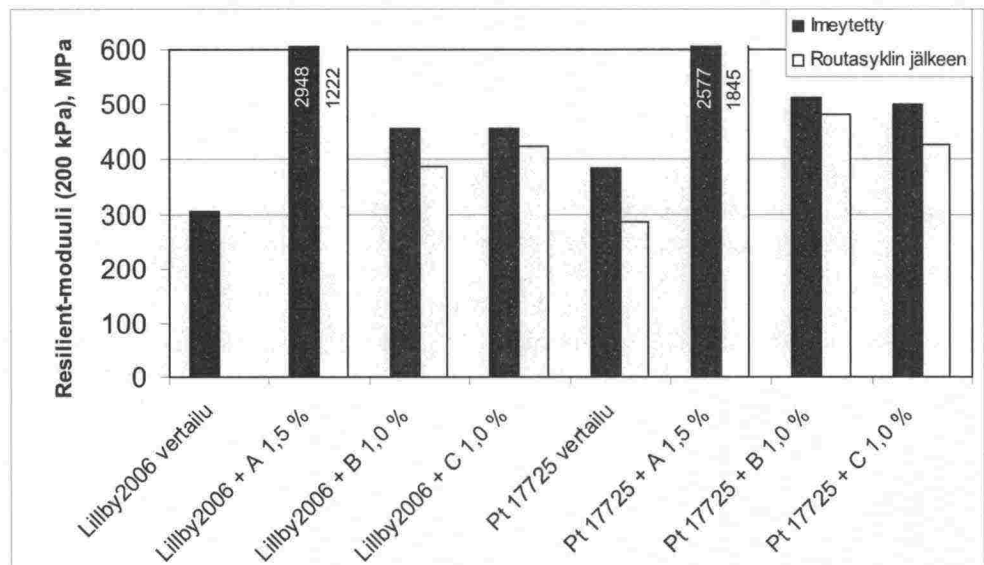
3.3 Mekaaniset ominaisuudet mitoitusta varten

3.3.1 Vuodenaikaisvaihtelua simuloivat sykliset kolmiaksaalikokeet

Vuodenaikaisvaihtelua simuloivat sykliset kolmiaksaalikokeet tehtiin TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön suurikokoisella dynaamisella kolmiaksaalikoelaitteistolla. Koesarjan tarkoituksena oli tutkia uusien käsittelyaineiden vaikutusta runkomateriaalien jäykkyyteen ja pysyviin muodonmuutoksiin erilaisissa kosteusolosuhteissa (kuivana, veden imeytyttyä näytteeseen näytteen alapohjan kautta ja jäädytys-sulatussyklin jälkeen). Tutkimuksessa

näytteiden korkeus oli noin 400 mm ja halkaisija 200 mm. Kokeet tehtiin pelkälle runkomateriaalille sekä käsittelyaineilla A, B ja C käsitellyille runkomateriaalille. Runkomateriaaleina kolmiaksiaalikoeteissa olivat Lillby2006-kalliomurske ja pt17725 kantavan kerroksen materiaali. Koesarjan yksityiskohdat on tarkemmin kuvattu ja käsitelty Antti Kalliainen (2008) diplomityössä "Uusien käsittelyaineiden vaikutus kosteustilaherkkien tierakennusmateriaalien mekaanisiin ominaisuuksiin".

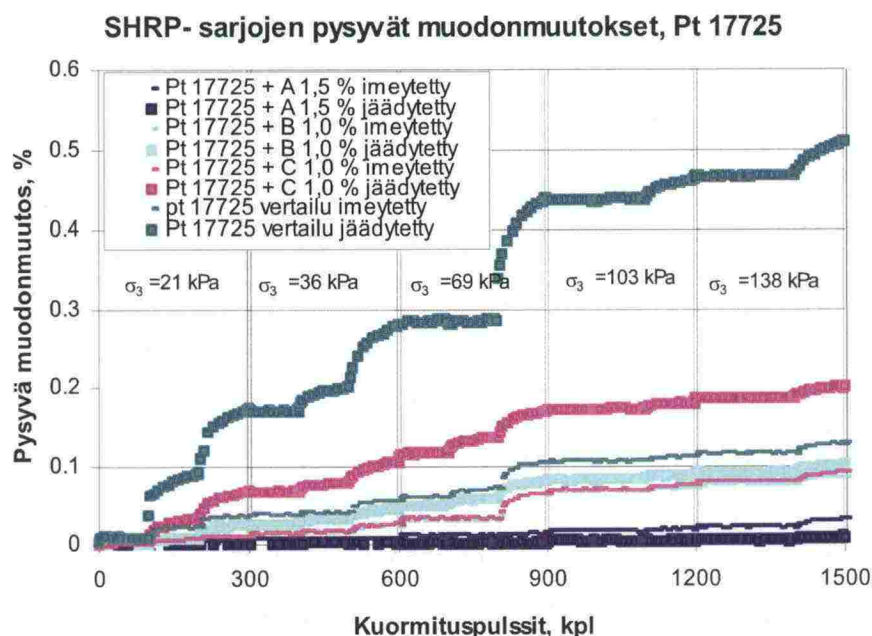
Kuvassa 13 on esitetty kolmiaksiaalikoeteiden resilient-moduulit 200 kPa:n jännitystasolla imeytetyistä ja routasyklin jälkeen kuormitetuista näytteistä SHRP-P46 protokollan (AASHTO 1992) mukaisesti mitattuina. Lillby2006 vertailunäytteen jäätymsulatussyklin jälkeisen kuormitusarjan tulokset menetettiin tekniseen vikaan. Käsittelyaine A 1,5 % pitoisuudella jäykisti näytteitä moninkertaisesti imeytettynä ja vielä jäädytys-sulatussyklin jälkeenkin, vaikka moduuliarvot tässä tapauksessa myös pienenevät suhteessa eniten verrattaessa imeytettynä ja jäädytys-sulatussyklin jälkeen kuormitettua näytettä toisiinsa. Myös käsittelyaineet B ja C 1 % pitoisuuksilla paransivat selkeästi moduuliarvoja verrattuna käsittelemättömään runkoaineeseen. (Kalliainen 2008)



Kuva 13 Kolmiaksiaalikoeteiden tulokset imeytetyistä ja routasyklin jälkeen kuormitetuista näytteistä mitattuina. Resilient-moduulit on esitetty 200 kPa:n jännitystasolla. (Kalliainen 2008)

Kuvassa 14 on esitetty vastaavasti resilient-moduulimäärittysten aikana muodostuneet pysyvät muodonmuutokset runkoaineella pt17725 tehdyissä kokeissa. Käsittelyaineella A käsiteltyyn näytteeseen muodostui vähiten pysyviä muodonmuutoksia ja käsittelyaineella B pysyvät muodonmuutokset olivat hyvin pieniä. Käsittelyaineella C käsitellyssä näytteessä jäädytys-sulatussyklin jälkeen pysyvät muodonmuutokset olivat selkeästi suurempia kuin käsittelyaineella B käsitellyssä näytteessä. Käsittelemättömään näytteeseen muodostui huomattavia pysyviä muodonmuutoksia. Jäädytys-syklin aikana käsittelemättömään näytteeseen muodostui vajaa 10 mm routanousua ja käsittelyaineella C käsitellyn näytteen routanousu oli melkein 5 mm,

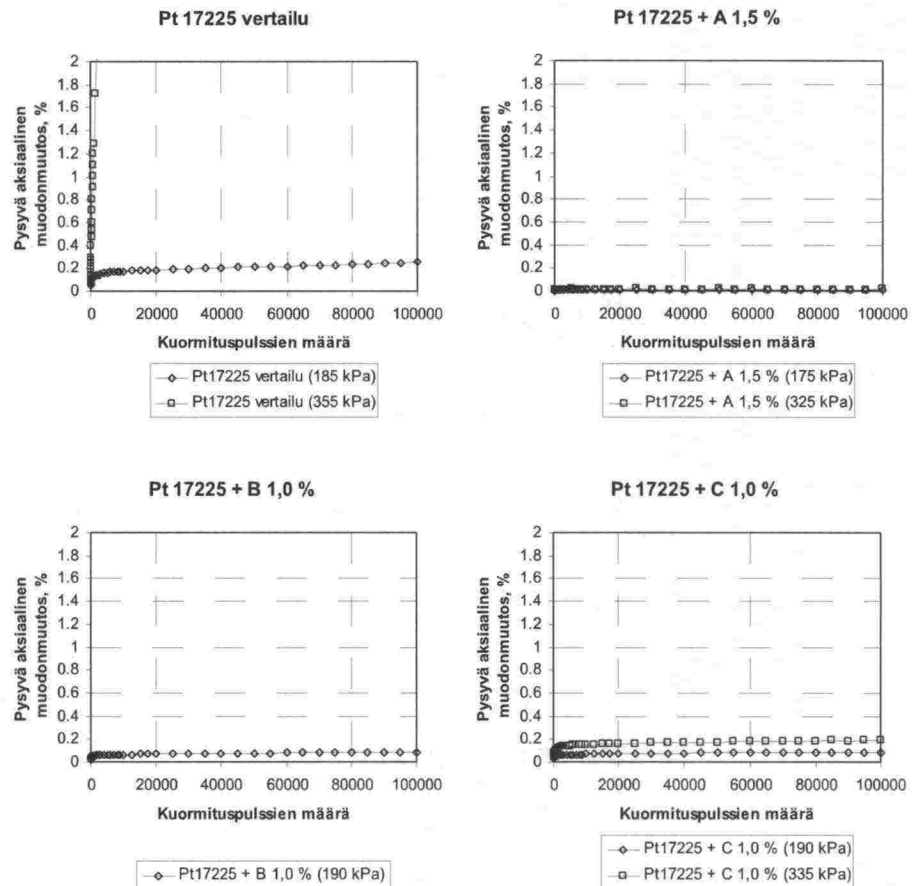
joten pysyvät muodonmuutokset olivat siten hyvin loogisia. Lillby2006-materiaalilla tehdyissä kokeissa oli samankaltainen trendi kuin pt 17725-materiaalilla tehdyissä kokeissa (Kalliainen 2008).



Kuva 14 Resilient-moduulien määritysten yhteydessä näytteistä mitatut pysyvät muodonmuutokset, kiviainesmateriaalina pt 17725. (Kalliainen 2008)

Jäädytys-sulatussyklin jälkeen tehtyjen resilient-moduulimääritysten (SHRP-sarjat) jälkeen koekappaleet kuormitettiin kahdella enintään 100 000 kuormituspulssin sarjalla, joissa näytteitä oli tarkoitus kuormittaa 150 ja 300 kPa:n deviatorisilla jännityksillä 50 kPa sellipaineessa. Tietokoneohjaus ei toiminut pitkän kuormitussarjan aikana aivan halutulla tavalla, vaan todelliset kuormituspulssit olivat yleensä suunniteltuja suurempia. Kuvassa 15 on esitetty pt17725 kantavan kerroksen materiaalille tehdyistä pitkistä kuormitussarjoista mitatut pysyvät muodonmuutokset jäädytys-sulatussyklin läpi käyneellä näytteellä. Kuvasta nähdään hyvin pt17725-materiaalilla tehdyn käsittelmättömän näytteen pitkissä kuormitussarjoissa syntyneet pysyvät muodonmuutokset ja näytteen hajoaminen suuremmalla deviatorisen jännityksen tasolla tehdyn toisen sarjan alussa. Käsittelyissä näytteissä ei koesarjoissa muodostunut enää merkittäviä pysyviä muodonmuutoksia. Käsittelyaineilla käsitelty Lillby2006-materiaalit käyttäytyivät samankaltaisesti kuin käsittelyaineella käsitelty pt17725-materiaalit. (Kalliainen 2008)

Vuodenaikaisvaihtelua simuloivien syklisten kolmiaksaalikokeiden perusteella käsittelyaineet A, B ja C paransivat tutkittujen materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. Käsittelyaine A oli tehokkain niin jäykkyyttä lisäävänä kuin pysyviä muodonmuutoksia ja routanousua estävänä aineena. Käsittelyaineet B ja C kasvattivat materiaalien jäykkyyttä saman verran. Käsittelyaine B esti kuitenkin tehokkaammin pysyvien muodonmuutosten syntymistä ja routanousua kuin käsittelyaine C. (Kalliainen 2008)



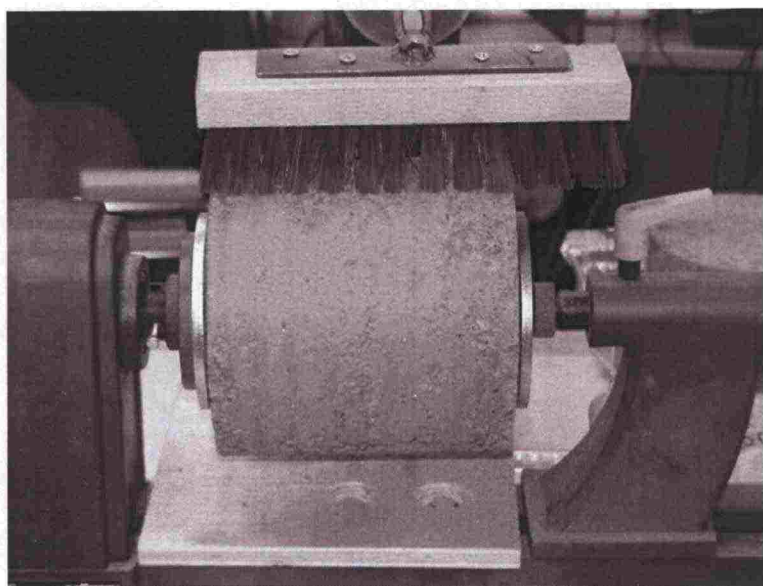
Kuva 15 Pt 17725 kantavan kerroksen materiaalille tehdyistä pitkistä kuormitussarjoista mitatut pysyvät muodonmuutokset jäädytys-sulatussyklin läpi käyneellä näytteellä. Kuormituspulssien deviatoriset jännitystasot on ilmoitettu selitteen jälkeen suluissa. Kokeissa sellipaine oli 50 kPa. Tekninen vika hajotti pt17725 + B 1,0 % näytteen suuremman kuormituspulssisarjan ensimmäisessä pulssisarjassa. (Kalliainen 2008)

3.3.2 Kulutuskokeet

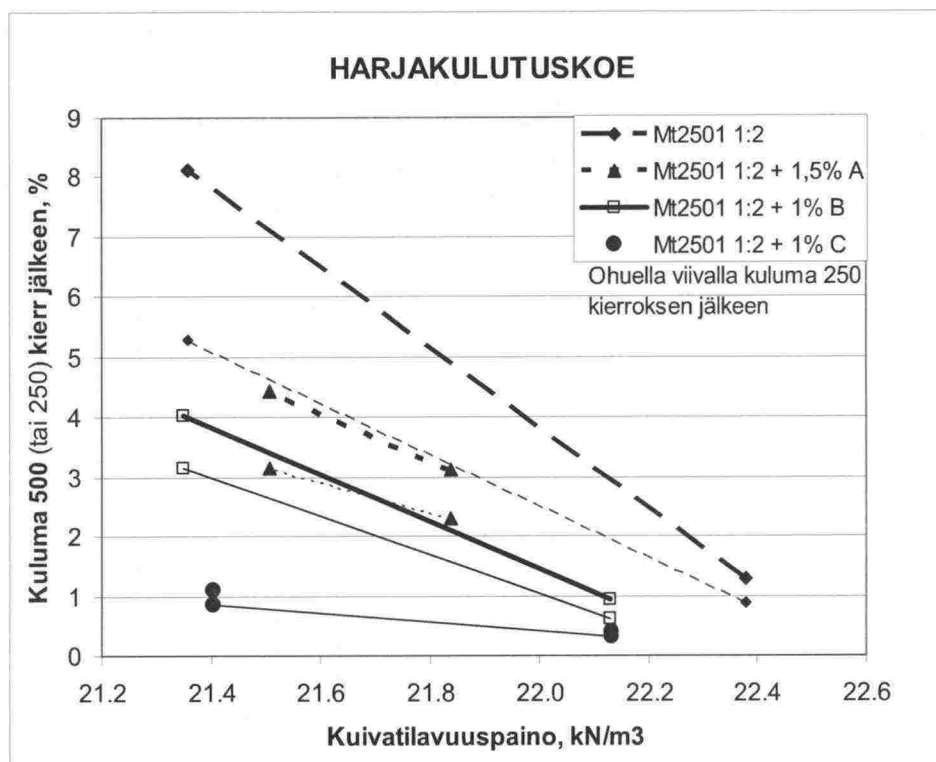
Projektin aikana mielenkiintoa herätti mahdollisuus, että uudella käsittelyaineella käsitelty kerros jäisi ilman päällystystä tien pintakerrokseksi. Kulutuskokeiden tarkoituksena oli saada tietoa kuinka hyvin käsitelty materiaali kestää mekaanista kulumista verrattuna käsittelemättömään materiaaliin ja kuivahkoon tien kulutuskerrosmateriaaliin.

Kulutuskokeita tehtiin ensisijaisesti kuvassa 16 esitetyllä harjakokeella (Abrasion Resistance Test). Harjakokeessa tiivistettyä ja kuivahtunutta halkaisijaltaan 150 mm olevaa koekappaletta harjattiin vakionopeudella 250 kierrosta, jonka jälkeen näyte punnittiin harjan aiheuttaman kuluman selvittämiseksi. Tämän jälkeen toistettiin 250 kierroksen harjaus ja koekappaleen punnitus. Kuvassa 17 on esitetty harjakokeen tulokset, kun runkoaineena oli mt2501 tieosalta 4 otetun kulutuskerroksen ja kantavan kerroksen seos suhteella 1:2. Koekappaleet harjakokeeseen tehtiin käsittelemättömänä sekä käsittelyaineella A 1,5 % pitoisuudella ja käsittelyaineilla B ja C 1 % pitoisuudella kahteen eri tiiviyyteen. Kuvasta 17 nähdään käsittelemättömän koe-

kappaleen kuluneen huomattavasi enemmän löyhemmällä näytteellä. Käsittelyaine A pienensi kuluman kokeessa melkein puoleen ja käsittelyaine B pienensi kulumaa yli puolella. Käsittelyaineella C käsitellyistä koekappaleista ei irronnut juurikaan materiaalia ja tiiviydellä ei ollut suurta merkitystä irronneen materiaalin määrään.

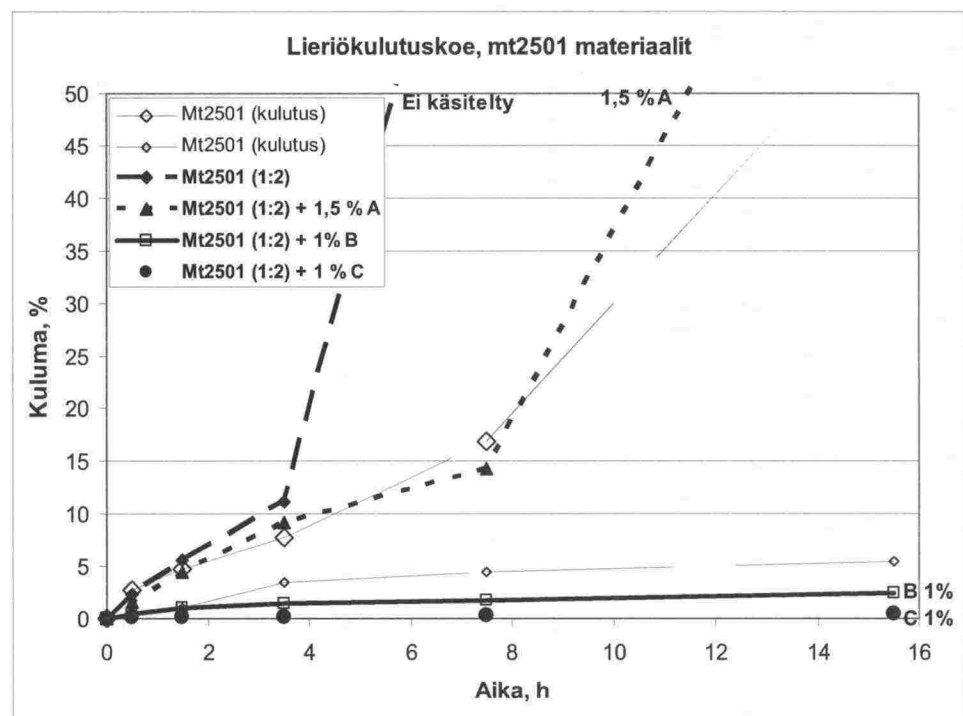


Kuva 16 Tutkimuksessa käytetty harjakoe.



Kuva 17 Harjakokeen tulokset mt2501-runkomateriaalilla, josta 1/3 oli kulutuskerroksen materiaalia ja 2/3 oli kantavan kerroksen materiaalia.

Lisäksi kulutuskokeita tehtiin lieriökulutuskokeella, joka oli kehitetty TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä tien kulutuserrosten ja pölynsidonta-aineiden ominaisuuksien tutkimiseen. Lieriökulutuskokeessa näytteen halkaisija oli 100 mm. Yksityiskohtaisempaa tietoa lieriökulutuskokeesta löytyy Maria Vähätalon (2005) diplomityöstä ”Soratien pölynsidonta teollisuuden sivutuotteilla”. Kuvasta 18 nähdään, että lieriökulutuskokeissa mt2501 runkoaineella saatiin samansuuntaiset koetulokset kuin harjakokeella. Mt2501 kulutuserros on kuivana hyvin tiivis ja kova, joten sen käyttäminen vertailuna antaa hyvän käsityksen käsittelyaineiden tehokkuudesta pitää koekappale yhtenäisenä. Lieriökokeen perusteella käsittelyaineilla B ja C käsitellyt koekappaleet kestivät hyvin kulutusta.



Kuva 18 Lieriökulutuskokeen tulokset mt2501-runkomateriaalilla, josta 1/3 oli kulutuserroksen materiaalia ja 2/3 oli kantavan kerroksen materiaalia. Vertailuna oli lisäksi kaksi mt2501:n pelkästä kulutuserroksesta tehtyä koekappaletta.

3.3.3 Vuonna 2005 tehtyjen koekohteiden seuranta

3.3.3.1 Koekohteiden seurannan ja mittausten analysoinnin periaate

Väkäste2-projektin yhteydessä on ollut käytössä mittaustuloksia kaikkiaan neljältä päällystetyltä koekohteelta vuodesta 2006 lähtien. Tiehallinnon S14-projektin, Vähäliikenteisten teiden taloudellinen ylläpito, puitteissa rakennetuissa kahdessa koekohteessa käytettiin kummassakin käsittelyainetta A ja B. Kaksi koekohteita, joissa käytettiin käsittelyainetta A, on rakennettu yhteistyössä Roadscanners Oy:n, TTY:n ja Rovaniemen kaupungin kesken.

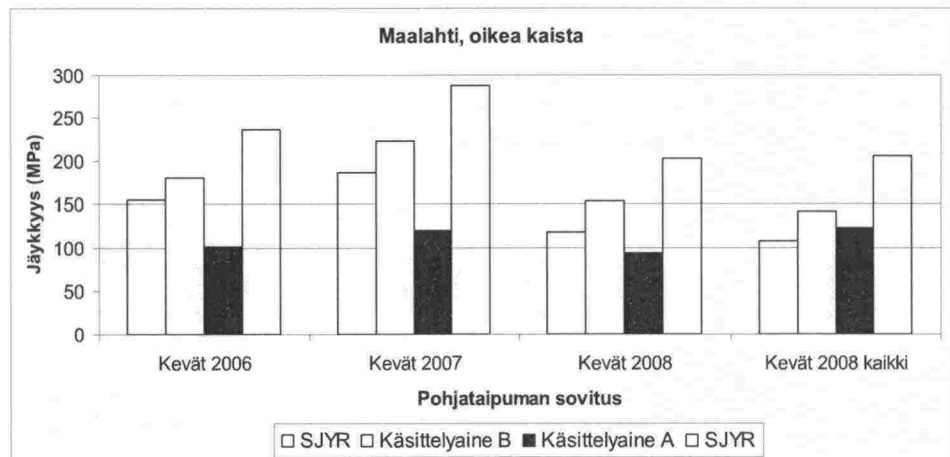
Tutkimuksellisesti painopiste oli S14-projektissa rakennetuissa koekohteissa.

Koekohteiden seuranta Väkäste2-projektissa perustui koekohteista vuonna 2005 tehtyihin maatumittauksiin sekä keväisin ja loppukesäisin tehtyjen pudotuspainolaitemittausten (PPL-mittaus) analysoimiseen. Vuonna 2008 PPL-mittaukset tehtiin tihennetyllä mittausverkolla. Maatumittauksesta saatiin PPL-mittausten kohdalta rakennekerrosten paksuudet, joita käytettiin takaisinlaskentojen lähtötietoina. Takaisinlaskennoissa hyödynnettiin Road-Doctor™-ohjelmistoa, jota käytettiin takaisinlaskennan lähtötietona käytettyjen pohjamaan moduuliarvojen laskemiseen. Takaisinlaskentojen tulokset perustuvat Elmod®5-ohjelmistolla laskettuihin jäykkyysarvoihin sekä niiden tueksi mitatuista taipumista laskettuihin indeksiarvoihin. Kaikki tulokset on laskettu lämpötilakorjattuina TPPT-menetelmäohjeen (Spoof ja Petäjä 2000) mukaisesti. Takaisinlaskennoissa käytettiin laskentametodina kaarevuussäteen sovitusta ja pohjataipuman sovitusta. Yksityiskohtaisesti koekohteiden seurantamittaukset, analysointimenetelmät ja niiden tulokset vuoteen 2007 asti on esitetty Antti Kalliaisen (2008) diplomityössä "Uusien käsittelyaineiden vaikutus kosteustilahrkkyiden tierakennusmateriaalien mekaanisiin ominaisuuksiin". Vuoden 2008 PPL-mittausten analysoinnin Kalliainen teki samalla tavalla kuin diplomityössään. Koekohteista takaisinlaskennalla määritettyjä jäykkyyksiä tarkasteltaessa on muistettava, että rakennekerroksissa oli liian ohut päällystekerros ja 150 mm paksuisena liian ohut ylin sitomaton kerros eli käsittelyaineella käsitelty kerros, jolloin takaisinlaskennoissa ei toteutunut kaksi oleellista reunaehtoaa. Tällöin laskettuja moduuliarvoja ei pidä käsitellä absoluuttisina arvoina vaan ensisijaisesti suhteellisina lukuina toisiinsa nähden.

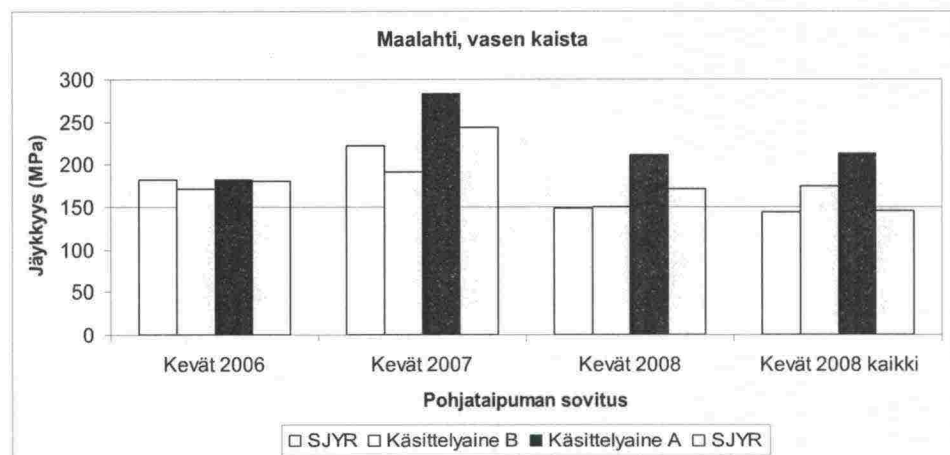
3.3.3.2 Maalahti

Maalahden koekohteen sijainti on Kråkbackvägen pt17560 tieosan 1 paaluväli 205-368 Vaasan tiepiirissä. Vuonna 2005 tehdyissä TS-kokeissa kantavan kerroksen dielektrisyysarvoksi määritettiin 11-14 (Roadscanners Oy ja TTY 2005). Koekohteessa vanha päällyste poistettiin kokonaan. Koekohteen kummallakin puolella tehdyssä sekoitusjyrsinnässä (SJYR) päällyste sekoitettiin kantavaan kerrokseen.

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty keväisin tehdyistä PPL-mittauksista lasketut jäykkyydet käsitetyille kerroksille. "Kevät 2008" mittaustuloksista on hyödynnetty vain samoja mittauspisteitä kuin keväällä 2006 ja 2007. Kuvista nähdään käsiteltyjen kerrosten jäykkyyksien olleen vasemmalla kaistalla selkeästi tasaisempia. Oikealla kaistalla käsittelyaineella A jäykkyydet olivat pienimmät, mutta vasemmalla kaistalla suurimmat. Keväisten mittausten vuosittaiseen vaihteluun vaikuttaa todennäköisesti eniten roudan sulamissyvyys mittausajankohtana, joten käsiteltyjen kerrosten jäykkyyksien kehittymisen ennakoimiseen ei ole vielä riittävän luotettavaa tietoa.

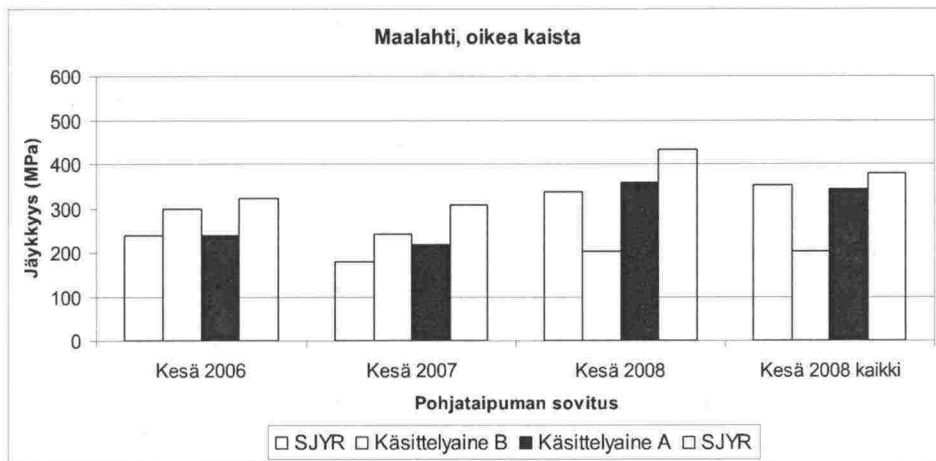


Kuva 19 Maalahden koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien keväiset keskiarvot oikealta ajokaistalta, laskentametodina oli pohjataipuman sovitus.

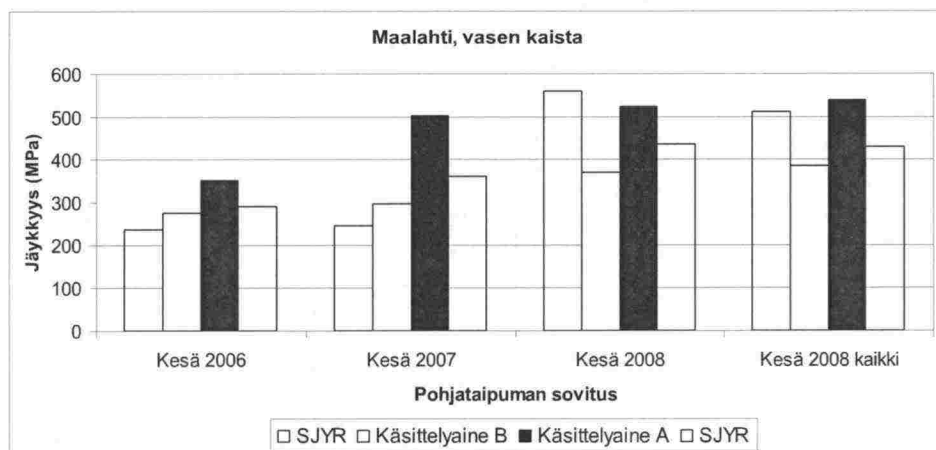


Kuva 20 Maalahden koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien keväiset keskiarvot vasemmalta ajokaistalta, laskentametodina oli pohjataipuman sovitus.

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty loppukesäisin tehdyistä PPL-mittauksista lasketut jäykkyydet käsitellyille kerroksille. "Kesä 2008" mittaustuloksista on hyödynnetty vain samoja mittauspisteitä kuin kesällä 2006 ja 2007. Kuvien perusteella käsitellyissä kerroksissa ei ollut merkittäviä eroja. Verrattaessa kuvia 19-22 havaitaan käsiteltyjen kerrosten olevan jäykkyydeltään samalla tasolla sekoitusjyrsityn kerroksen kanssa. Käsittelyaineella B käsiteltyjen kerrosten jäykkyydessä oli kaikkiaan vain vähän vaihtelua kevään ja kesän välillä.

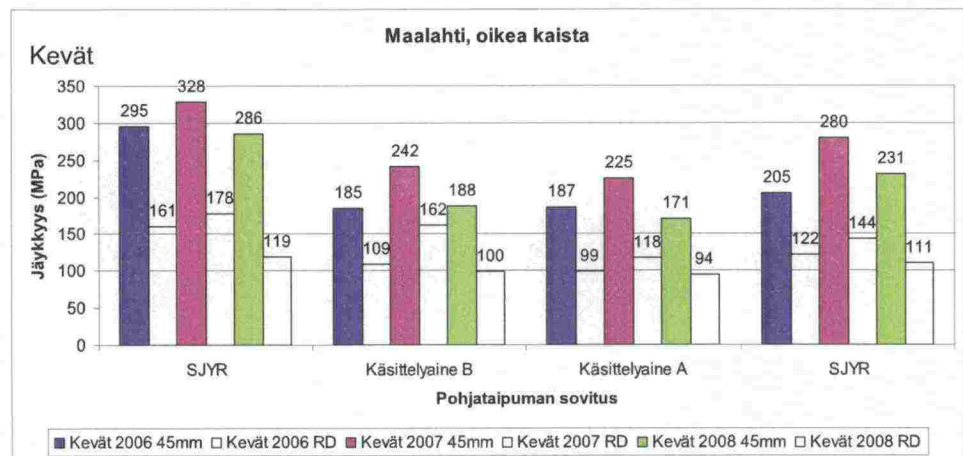


Kuva 21 Maalahden koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien kesäiset keskiarvot oikealta ajokaistalta, laskentametodina oli pohjataipuman sovitus.



Kuva 22 Maalahden koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien kesäiset keskiarvot vasemmalta ajokaistalta, laskentametodina oli pohjataipuman sovitus.

Kuvassa 23 on esitetty päällystepaksuuden merkitystä keväällä tehdyistä mittauksista takaisinlaskennalla saataviin jäykkyyksiin. Toisessa laskennassa käytettiin maatutkamittauksesta (RD) määritettyä päällystepaksuutta ja toisessa päällystepaksuudeksi asetettiin 45 mm. Maatutkamittauksessa Maalahden kohteen oikean kaistan päällystepaksuudeksi oli pääsääntöisesti määritetty 60-80 mm. Kuvan perusteella päällystepaksuudella on hyvin suuri merkitys takaisinlaskennasta saatavaan keväiseen jäykkyyteen. Kesäisissä mittauksissa päällystepaksuuden merkitys ei ollut yhtä suuri. Maalahden vasemmalla kaistalla maatutkamittauksesta määritetyt päällystepaksuudet olivat pienempiä kuin oikealla kaistalla, joka saattaa osaltaan selittää jäykkyyksien eroavaisuuksia kaistojen välillä kuvissa 19-22.



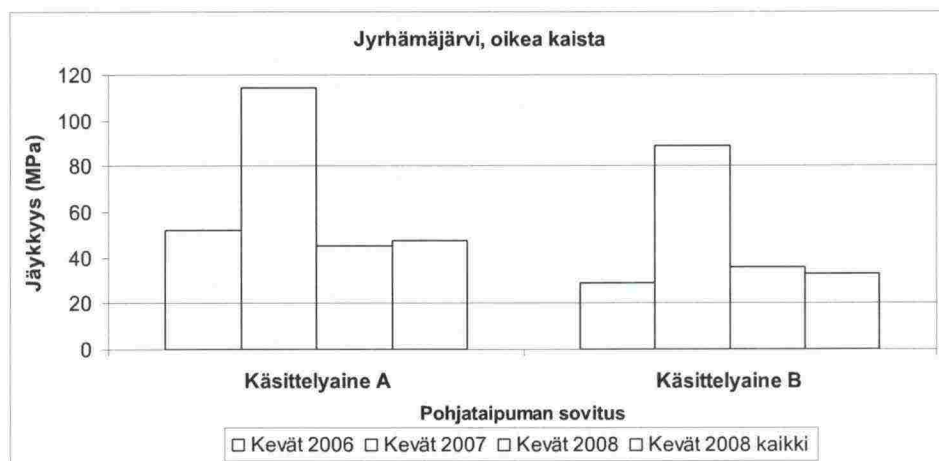
Kuva 23 Päälystepaksuuden vaikutus takaisinlaskennalla saataviin käsiteltyjen kerrosten jäykkyyksiin keväisin Maalahden koekohteen oikealla ajokaistalla, laskentametodina oli pohjataipuman sovitus.

3.3.3.3 Jyrhämäjärvi

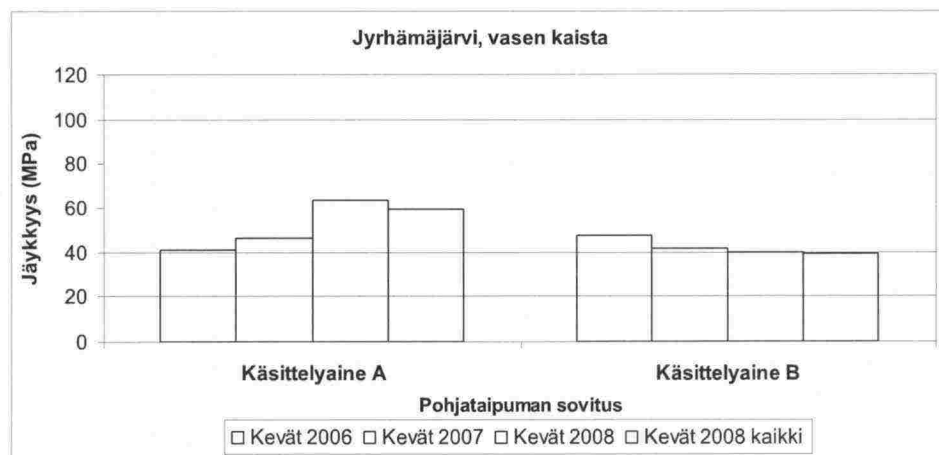
Jyrhämäjärven koekohteen tarkka sijainti on pt19735 tieosan 1 paaluväli 2100-2365 lähellä Rovaniemeä. Vuonna 2005 tehdyissä TS-kokeissa kantavan kerroksen dielektrisyysarvoksi määritettiin 42-45 (Roadscanners Oy ja TTY 2005). Koekohteessa muulle soratieosuudelle ei tehty ojien kunnostamisten lisäksi muita korjaustoimenpiteitä. Koe kohde rakennettiin kohdalle, jossa tiellä oli havaittu pahimmat kelirikko-ongelmat keväisin.

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty keväällä tehdyistä PPL-mittauksista lasketut jäykkyydet käsitellyille kerroksille. "Kevät 2008" mittaustuloksista on hyödynnetty vain samoja mittauspisteitä kuin keväällä 2006 ja 2007. Keväällä käsitelyaineella A käsitellyn kerroksen jäykkyydet olivat suuruusluokkaa 50 MPa ja käsitelyaineella B käsitellyn kerroksen jäykkyydet olivat 30-40 MPa.

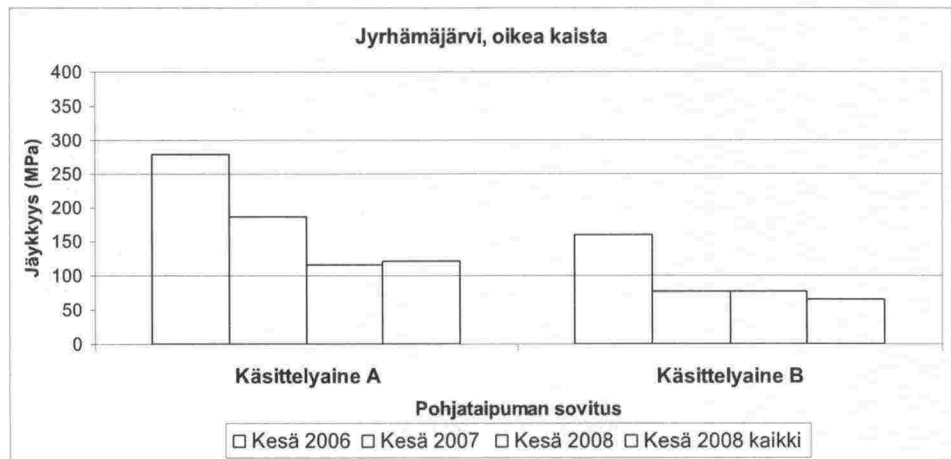
Kuvissa 26 ja 27 on esitetty loppukesällä tehdyistä PPL-mittauksista lasketut jäykkyydet käsitellyille kerroksille. "Kesä 2008" mittaustuloksista on hyödynnetty vain samoja mittauspisteitä kuin kesällä 2006 ja 2007. Kuvien perusteella käsitelyaineella A käsitellyssä kerroksessa jäykkyydet olivat suurempia kuin käsitelyaineella B käsitellyssä kerroksessa. Koe kohteilla takaisinlaskentamenetelmällä määritettyjen kantavan kerroksen moduuliarvojen alhaiseen yleistason vaikuttaa omalta osaltaan aiempina jo mainittu menetelmän puutteellinen soveltuvuus ohutpäälysteisille teille (Luomala et al. 2008)



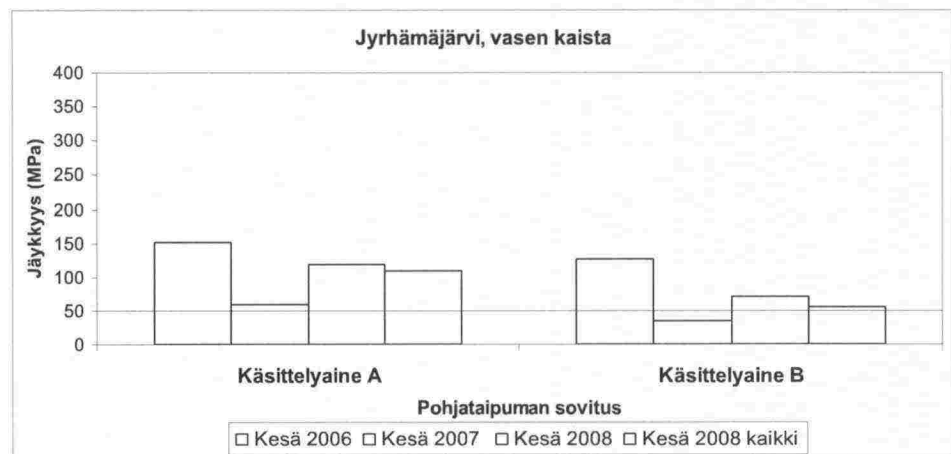
Kuva 24 Jyrhämäjärven koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien keväiset keskiarvot oikealta ajokaistalta, laskentametodina oli pohjataipuman sovitus.



Kuva 25 Jyrhämäjärven koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien keväiset keskiarvot vasemmalta ajokaistalta, laskentametodi oli pohjataipuman sovitus.

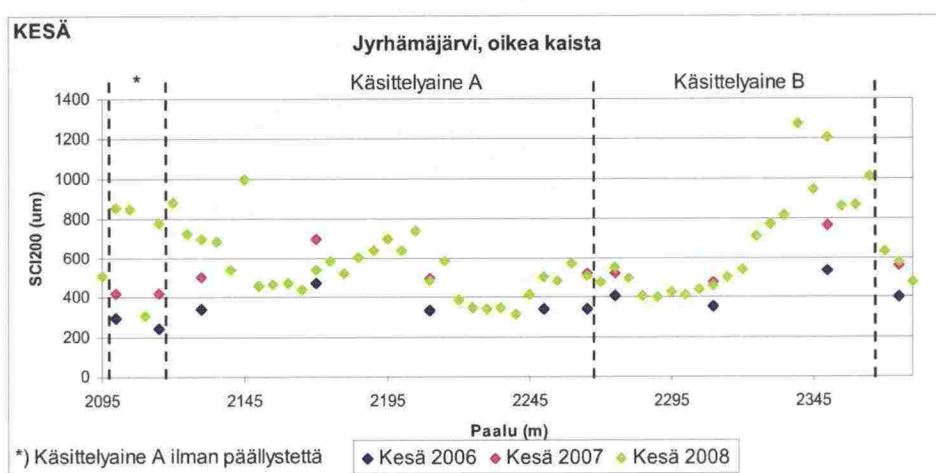


Kuva 26 Jyrhämäjärven koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien kesäiset keskiarvot oikealta ajokaistalta, laskentametodi oli pohjataipuman sovitus.

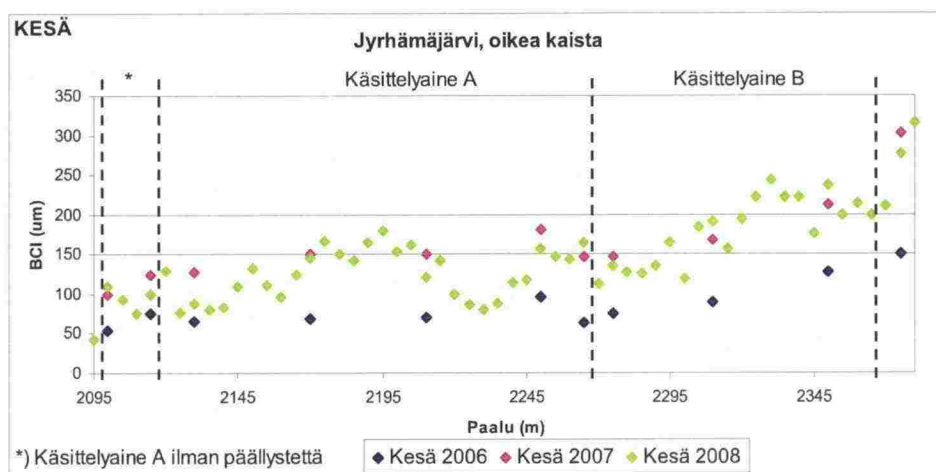


Kuva 27 Jyrhämäjärven koekohde, käsitellyn kerroksen jäykkyyksien kesäiset keskiarvot vasemmalta ajokaistalta, laskentametodi oli pohjataipuman sovitus.

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty kesällä 2006, 2007 ja 2008 tehdyistä oikean kaistan PPL-mittauksista SCI200- ja BCI-indeksit. Indeksit olivat pienimmät vuonna 2006 eli ensimmäisenä vuonna ojen kunnostamisen jälkeen. Kuvasta 28 nähdään SCI200-indeksien olleen pääsääntöisesti 400-700, mutta vuonna 2008 ne olivat 900-1200 välillä pl 230-260. Kuvasta 29 nähdään BCI-indeksien olleen pääsääntöisesti 100-150. Vuosina 2007 ja 2008 paalulukeman ollessa suurempi kuin 230 BCI-indeksit olivat tosin suuruusluokkaa 200-250, mikä tarkoittaa, että pohjamaa on erittäin heikkoa. Erittäin heikko pohjamaa vaikuttaa käsitellyn kerroksen tiivistettävyyteen, joka vaikuttaa edelleen osaltaan käsittelyaineen vaikutuksen tehokkuuteen.



Kuva 28 Jyrhämäjärven koekohteella kesällä tehtyjen PPL-mittausten SCI200-indeksit.



Kuva 29 Jyrhämäjärven koekohteella kesällä tehtyjen PPL-mittausten BCI-indeksit.

Jyrhämäjärven koekohteen olosuhteet ovat erittäin haastavat. Tarkasti ei ole erotettavissa paljonko erittäin heikko pohjamaa ja vanha tierunko lopulta vaikuttavat määritettyihin jäykkyyksiin. Käsittelyaineiden välillä ei välttämättä ole merkittäviä eroja, jos koekohteen loppuosan erityisen heikon kohdan arvoja ei huomioida. Tällöin käsiteltyjen kerrosten jäykkyydet keväällä olisivat hieman yli 50 MPa. Kesällä käsittelyaineella A käsitellyn kerroksen jäykkyys olisi noin 100-150 MPa ja käsittelyaineella B käsitellyn kerroksen jäykkyys olisi hieman pienempi eli noin 100 MPa.

3.3.4 Yhteenveto mekaanisten ominaisuuksien tuloksista

Laboratoriokokeiden perusteella kaikki kolme käsittelyainetta paransivat runkomateriaalin jäykkyyttä ainakin jonkin verran. Käsittelyaine A vaikutti jäykkyyteen merkittävästi. Käsittelyaineiden jäykkyyttä kasvattavaa vaikutusta ei havaittu Maalahden koekohteessa, jossa TS-kokeella määritetyn dielektrisyysarvon (11-14) perusteella runkomateriaali on kuitenkin kategorisoitu kyseenalaiseksi kantavan kerroksen murskeeksi. Toinen eroa selittävä seikka voi olla koekohteiden rakentamisen aikaiset olosuhteet. Koekohteet rakennettiin syksyllä, jolloin tierakenne on ollut jo kohtuullisen märkä, eikä rakenne ole rakentamisen jälkeen päässyt kuivumaan riittävästi ennen jäätymistä. Sen sijaan laboratoriossa näytteitä kuivatettiin tiivistämisen jälkeen. Veden poistuminen käsitellystä materiaalista ennen ensimmäistä jäätymistä vaikuttaa todennäköisesti käsittelyaineiden tehokkuuteen.

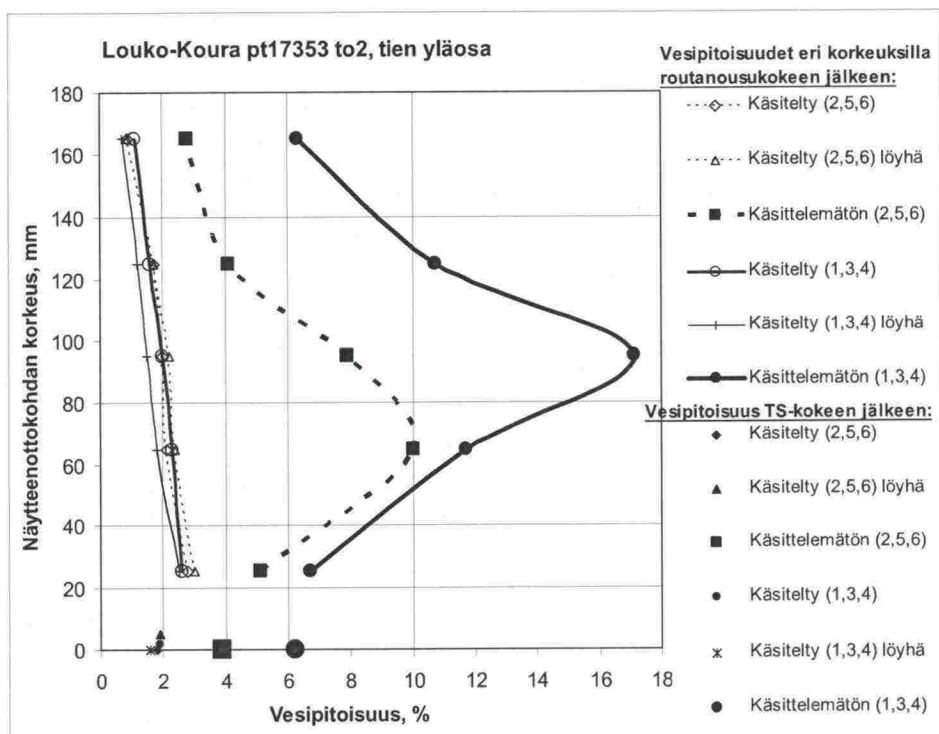
Laboratoriokokeiden perusteella voidaan todeta, että käsittelyaineet A, B ja C estivät varsin tehokkaasti pysyvien muodonmuutosten syntymistä. Laboratoriokokeiden perusteella ei kuitenkaan pystytä täysin todistamaan käsittelyaineiden vaikutusta pysyvien muodonmuutosten estäjänä tierakenteessa, vaan siihen tarvitaan seurantatietoja jo ennen käsittelyaineiden käyttöä sekä käsittelyaineilla toteutetun rakenteen parantamisen jälkeen. Lisäksi on huomattava, että pysyvien muodonmuutosten syntyy tierakenteessa vaikuttavat käsitellyn kerroksen lisäksi myös muiden rakennekerrosten ja alusrakenteen ominaisuudet.

Suppeahkojen kulutuskokeiden perusteella käsittelyaineita B ja C voisi käyttää sorateiden parantamiskohteissa päällystämättä kohdetta käsittelyn jälkeen. Tällöin on varmistettava, että käsittelyaineella B käsitellyn kerroksen pintaosa voidaan tiivistää riittävän tiiviiksi. Tämä mahdollistaisi käsittelyaineiden B ja C käytön pintakelirikkokohteissa. Käsittelyaineella A käsiteltyä kerrosta ei suositella jätettäväksi ilman päällystettä.

3.4 LOUKO-KOURA -KOEKOHDE

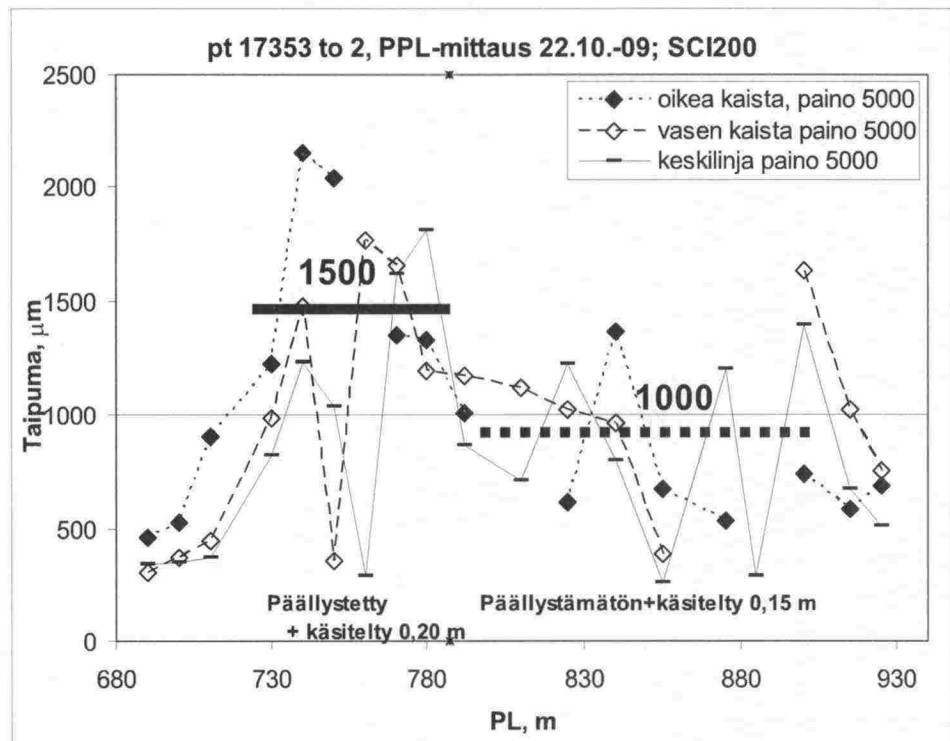
Väkäste2-projektin aikana rakennettiin 20.8.2008 Seinäjoelle Louko-Kouran tielle koekohde Vaasan tiepiirin rahoituksella. Ensisijaisesti pintakelirikko-ongelmista kärsivälle tielle tehdyn koekohteen tarkka sijainti on pt17353 to2 pl 720-909. Paaluvälillä 720-794 käsittelyaine B sekoitettiin 0,20 m syvyyteen asti ja paaluvälillä 794-909 sekoitus tehtiin 0,15 m syvyyteen. Koekohteen alkuosalle paalulle 787 asti tuli ohut päällyste loppuosan jäädessä päällystämättä.

Kohteeseen liittyvät laboratoriokokeet tehtiin Väkäste2-projektissa kesällä 2008. Koekohteesta otatettiin näytteet neljästä pisteestä, joissa oli kahta erilaista materiaalia. TS-kokeista määritetyt dielektrisyysarvot 10 vuorokauden kohdalla olivat suuruudeltaan noin 40 ja 10. Kuvassa 30 on esitetty routanousukokeen jälkeen Louko-Kouran koekappaleista määritetyt vesipitoisuudet. Käsittlemättömiin materiaaleihin muodostui jäälinsit 60-100 mm korkeudelle routanousujen ollessa 4,5 mm ja yli 8 mm. Routanousukokeessa käsittelyaineella B käsiteltyihin koekappaleisiin ei imeytynyt lisää vettä edes löyhemmillä tiiviyksillä.

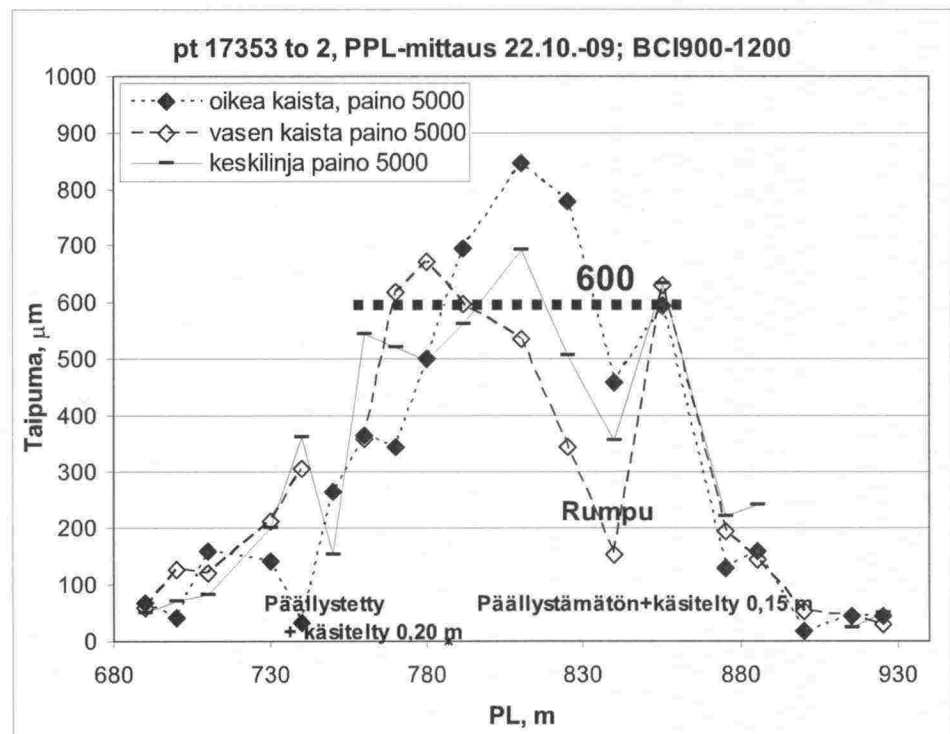


Kuva 30 Louko-Kouran materiaaleista routanousukokeen jälkeen eri korkeuksilta määritetyt vesipitoisuudet ja laskennallisesti määritetyt vesipitoisuudet TS-kokeen jälkeen ennen routanousukoetta.

Maatutkamittauksen lisäksi koekohteella teetettiin PPL-mittaukset syksyllä 2008. Kuvissa 31 ja 32 on esitetty PPL-mittauksista lasketut SCI200- ja BCI-indeksit, jotka olivat todella suuria. PPL-mittausten perusteella koekohteessa lienee olla pintakelirikon lisäksi ongelmana erittäin heikko alusrakenne. Louko-Kouran koekohte on kuitenkin erittäin hyvä vertailurakenne erittäin vaati-
viin olosuhteisiin tehdystä rakenteen parantamisesta.



Kuva 31 Louko-Kouran koekohteelta kaksi kuukautta käsittelyn jälkeen tehtyjen PPL-mittausten SCI20- taipumat.



Kuva 32 Louko-Kouran koekohteelta kaksi kuukautta käsittelyn jälkeen tehtyjen PPL-mittausten BCI (900-1200) taipumat.

4 ELINKAARIANALYYSI

Elinkaarianalyysin laskelmat tehtiin noudattaen menetelmäkuvauksen TPPT 20 (Petäjä ja Spoof 2001) laskentakaavoja. Koska uusien käsittelyaineiden kestoiästä ei ole vielä tietoa, niin vuosikustannukset laskettiin useilla rakenteen uusimisajoilla. Koska elinkaarianalyysissä verrattiin eri menetelmiä toisiinsa, laskennoista jätettiin pois niitä kustannuksia, joiden voitiin olettaa olevan samat eri menetelmillä.

Laskennassa käytettävät lähtöhinnat saatiin Väkäste2-projektin johtoryhmälle lähetetyn hintatiedustelun perusteella. Täydennystä tiedustelun tuloksille saatiin kirjallisuudesta, joista käytettiin lähinnä Ahon (2004) ja Kuusiston (2004) sekä S14-koerakentamiseen liittyneiden (Roadscanners Oy ja TTY 2005) tutkimusten tietoja. Kustannukset on laskettu 5,5 m leveälle tielle.

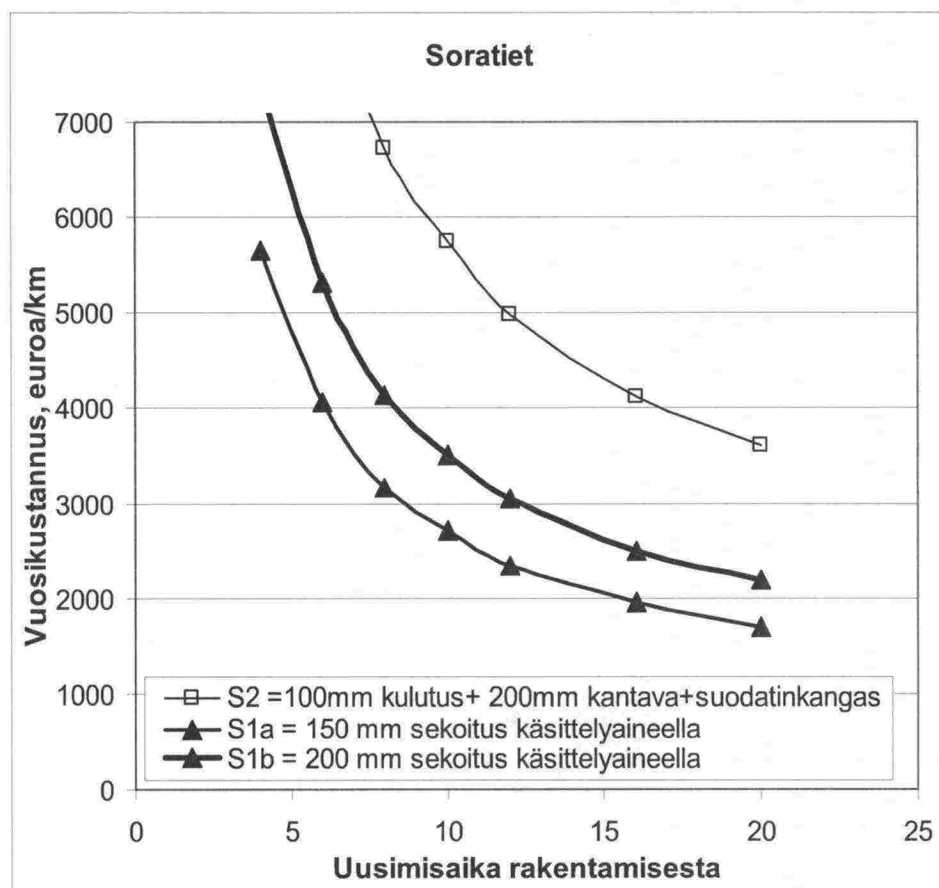
4.1 Soratiet

Sorateiden elinkaarianalyysissä tarkasteltiin vaihtoehtoina uusien käsittelyaineiden käyttämistä 1 % pitoisuudella soratiekohteessa, joka jää päällystämättä, sekä suodatinkangas + 200 mm kantava kerros + 100 mm kulutuskerros -rakennetta.

Käsittelyaineiden B ja C hinta-arvioksi saatiin 700-800 €/tonni. Uusille käsittelyaineille laskettiin vuosikustannukset ohuemmalle 150 mm ja paksummalle 200 mm käsittelylle. Ohuemmalla kerroksella (S1a) käytettiin edullisempaa käsittelyaineen hintaa ja 200 mm kerroksen käsittelylle (S1b) kalliimpaa käsittelyaineen hintaa. Sekoitustyön hintana käytettiin 1,4 €/m². Lisäksi tien oletettiin tarvitsevan joka neljäs vuosi hoitotoimenpiteitä, joiden hinnaksi on oletettu 1000 €/km. Diskontatuksi hinnaksi laskettiin 23 000 ja 30 000 €/km rakenteen uusimisajan ollessa 20 vuotta.

Suodatinkangas + 200 mm kantava + 100 mm kulutuskerros -rakenteen (S2) rakentamishinnaksi laskettiin 43 000 €. Asennetun suodatinkankaan hintana käytettiin 1 €/m² ja kantavan kerroksen rakentamiskustannuksena 25 500 €/km sekä kulutuskerroksen rakentamiskustannuksena 12 000 €/km. Rakenteen oletettiin tarvitsevan sorastusta joka neljäs vuosi ja pölynsidontaa joka toinen vuosi. Sorastuksen hintana käytettiin 1450 €/km ja pölynsidonnan hintana käytettiin 300 €/km. Rakenteen diskontatuksi hinnaksi laskettiin 49 200 €/km rakenteen uusimisajan ollessa 20 vuotta.

Kuvassa 33 on esitetty soratielle parantamisratkaisujen vuosikustannukset. Kuvasta nähdään uusien käsittelyaineiden olevan edullisempi, jos sen keskoikä on vähintään puolet vertailurakenteena käytettävän suodatinkangas + 200 mm kantava kerros + 100 mm kulutuskerros -rakenteen kestoiästä.



Kuva 33 Uusien käsittelyaineiden vuosikustannukset verrattuna vaihtoehtorakentamiseen.

4.2 Päälystettävät tiet

Päälystettävien teiden elinkaarianalyyssissä tarkasteltiin vaihtoehtoina uusien käsittelyaineiden käyttämistä, bitumistabilointia 3,6 % bitumipitoisuudella ja suodatinkangas + 200 mm kantava kerros -rakennetta sekä sekoitusjyrsintää. Päälysteenä kaikissa tapauksissa olisi PAB-V, jonka hintana käytettiin 5,2 €/m². Eri vaihtoehtojen ei ole oletettu tarvitsevan hoitotoimenpiteitä.

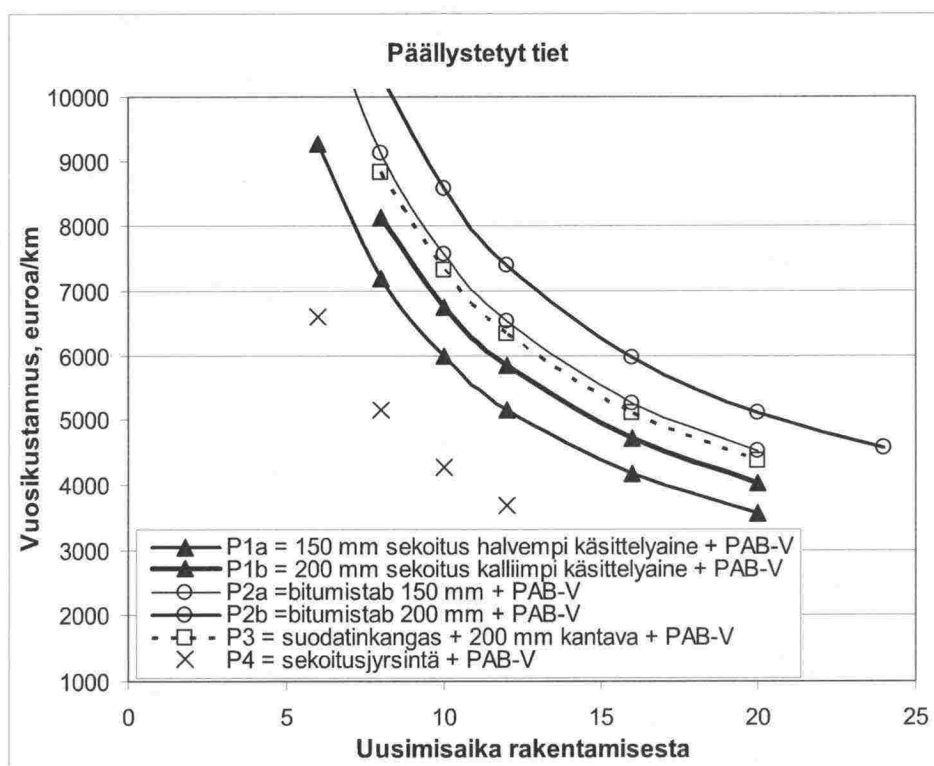
Käsittelyaineiden B ja C hinta-arvioksi saatiin 700-800 €/tonni. Uusille käsittelyaineille laskettiin vuosikustannukset ohuemmalle 150 mm ja paksummalle 200 mm käsittelylle. Ohuemmalla kerroksella (P1a) käytettiin edullisempaa käsittelyaineen hintaa ja 200 mm kerroksen käsittelylle (P1b) kalliimpaa käsittelyaineen hintaa. Sekoitustyön hintana käytettiin 1,4 €/m². Rakentamiskustannukseksi laskettiin 48 500 ja 54 800 €/km.

Bitumistabiloinnissa (P2) bitumiemulsion hintana käytettiin 400 €/tonni ja käytettävänä pitoisuutena 3,6 %. Vuosikustannukset laskettiin ohuemmalle, 150 mm (P2a) ja paksummalle 200 mm (P2b) stabiloinnille. Sekoitustyön hintana käytettiin 1,4 €/m². Rakentamiskustannukseksi laskettiin 61 300 ja 69 500 €/km.

Suodatinkangas + 200 mm kantavan kerroksen lisäyksessä (P3) asennetun suodatinkankaan hintana käytettiin 1 €/m^2 ja kantavan kerroksen rakentamiskustannuksena $25\,500 \text{ €/km}$. Rakentamiskustannukseksi saatiin $59\,400 \text{ €/km}$.

Sekoitusjyrsinnässä (P4) sekoitustyön hintana käytettiin $1,1 \text{ €/m}^2$. Rakentamiskustannukseksi laskettiin $34\,650 \text{ €/km}$.

Kuvassa 34 on esitetty päällystettävien teiden parantamisratkaisujen vuosikustannukset. Kuvasta nähdään uusien käsittelyaineiden olevan edullisempia kuin bitumistabilointi tai suodatinkangas + 200 mm kantavan kerroksen lisäys, jos niillä on sama kestoikä. Sekoitusjyrsintä ja päällysteen uusinta on kuitenkin selkeästi halvempi, joskin vaikutukseltaan todennäköisesti lyhytaikaisempi menetelmä.



Kuva 34 Uusien käsittelyaineiden vuosikustannukset verrattuna vaihtoehtorakenteeseen, kun rakentamisen jälkeen tie päällystetään.

5 OHJEISTUS UUSIEN KÄSITTELYAINEIDEN KÄYTTÖÖN OTTAMISEEN

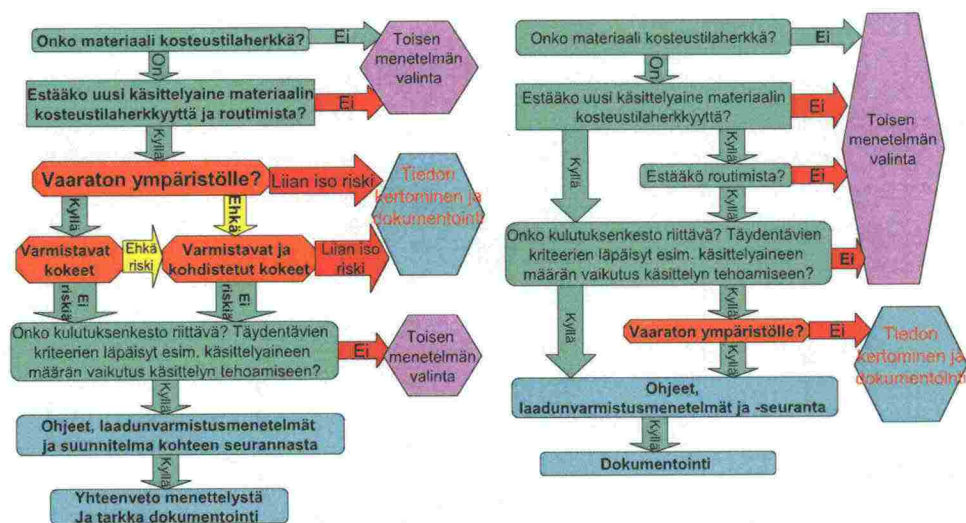
Väkäste2-projektissa kirjoitetussa ohjeistuksessa pyrittiin antamaan suunta-
viivat uuden käsittelyaineen kokeilemisesta ja käyttöönottamisesta kosteusti-
laherkän tierakennusmateriaalien ominaisuuksien parantamiseen. Ohjeis-
tuksessa pyrittiin tähdentämään, että uutta käsittelyainetta koskevan tietou-
den lisääntyessä sen soveltuvuuden varmistaminen kohteeseen yksinker-
taistuu ja nopeutuu. Uuden käsittelyaineen käyttöönotto voidaan jakaa kar-
keasti ottaen kolmeen vaiheeseen.

- 1 Uutta käsittelyainetta käytetään ensimmäisiä kertoja Suomessa ja siitä ei ole luotettavaa ja hyvin dokumentoitua tietoa suomalaisia olosuhteita vastaavista kohteista. Ohjeistuksen tavoitteena on selvittää mitä pitää tehdä, jotta uuden käsittelyaineen käyttöönotto voisi edetä. Kuvan 35 vasemman puoleinen kaavio kuvaa prosessin etenemistä tämän kaltaisessa tapauksessa, jolloin tarkempi taustatietojen keräys ja laajemmat tutkimukset sekä tarkka koekohteiden rakentamisen seuranta dokumentoidaan mahdollisimman huolellisesti ja yksityiskohtaisesti. Lisäksi suunnitellaan huolella seurantaohjelma systemaattista tiedon keräystä varten. Vain kokemusten dokumentoimisen kautta voidaan edetä uuden käsittelyaineen käyttöönotossa.
- 2 Käsittelyaineesta on kertynyt kokemusta ja tietoa niin paljon, että ennakokokeista voidaan sivuuttaa useita aikaa vieviä ja kalliita testejä. Kuvan 35 oikean puoleinen kaavio kuvaa tutkimusten etenemistä tämän kaltaisessa tilanteessa, kun aikaisemmista käyttökohteista on hyvin dokumentoiduilla tutkimuksilla luotu tietopohja uudesta käsittelyaineesta. Käsittelyainetta koskevan tietouden kasvaessa toimintatavat uuden käsittelyaineen sopivuuden testauksessa virtaviivaistuvat entisestään.
- 3 Käsittelyaine on vakiintumassa rakenteen parantamismenetelmäksi ja siitä kertynyt tietous riittää käsittelyaineelle luotavan oman ohjeen/ohjeistuksen laatimiseen.

Kaikissa vaiheissa tehtyjen mittausten ja kokeiden tulosten tarkoituksena on ensisijaisesti varmistaa seuraavat asiat;

- Käsiteltävä runkoaines eli materiaali on kosteustilaherkkä.
- Uusi käsittelyaine pienentää riittävästi runkoaineen kosteustilaherkkyttä.
- Varmistetaan, että vaurioiden pääaiheuttaja on kosteustilaherkkä runkoaine.
- Varmistetaan, että käsitelty kerros voidaan tiivistää kunnolla tai että löyhäksi jääväkin käsitelty kerros toimii kuitenkin riittävän hyvin.
- Hallitusti tiehen sekoitettu uusi käsittelyaine ei ole ympäristölle haitallinen.

Dokumentointi antaa tietoa ja pohjan hyvälle rakenteen parantamismenetelmälle ja laadukkaalle työskentelylle



Kuva 35 Vasemman puoleinen kaavio kuvaa testauksen etenemisestä ja tuotettavia dokumentteja, kun uuden käsittelyaineen käytöstä ei ole juurikaan kokemusta Suomesta vastaavista olosuhteista. Oikeanpuoleinen kaavio kuvaa testauksen etenemisestä ja tuotettavia dokumentteja, kun uuden käsittelyaineen käytöstä on hyvin dokumentoitua kokemusta Suomesta tai Suomesta vastaavista olosuhteista

6 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Tutkimusprojekteissa käsittelyaine B on toiminut hyvin kaikilla testatuilla kiviaineilla. Kolmen jo rakennetun koekohteen lisäksi kesällä ja syksyllä 2009 on tarkoitus tehdä kolme hieman pidempää koekohtetta, joista saataneen tarvittavaa lisätietoa käsittelyaineen B toimivuudesta esim. päällystämättömänä. Lisäksi käsittelyaineen B sisältämä myrkyllisin osa eli isotiatsoli on mahdollista korvata ympäristöystävällisemmällä aineosalla tai jopa jättää kokonaan pois, jos käsittelyaine käytetään muutamien päivien sisällä sen valmistamisesta (Ristilä 2008). Lisäksi käsittelyaine B on itsessään uusiutuvista luonnonvaroista eli puuraaka-aineesta valmistettava tuote, mitä voidaan hyödyntää tuotteen markkinoinnissa (Väkäste2-projektin johtoryhmä 2008)

Laboratorio-olosuhteissa käsittelyainetta B on testattu 0,4-1,6 % pitoisuuksilla, missä yhteydessä on todettu, että 0,4 % alkaa olla liian pieni pitoisuus. Toisaalta pitoisuuden nostaminen 0,8-1,0 %:sta 1,6 %:iin ei ole juurikaan heikentänyt tai parantanut käsittelyaineen vaikutusta. Käsittelyaineen B vaikutuksen havaittiin pienenevän radikaalisti, jos käsiteltyä materiaalia säilytetään käsittelyn jälkeen alhaisessa lämpötilassa (6-8 °C), jossa materiaali ei juuri pääse kuivahtamaan. Tämä ei ole kuitenkaan välttämättä suuri ongelma, koska käsittelyaineen B havaittiin alkavan toimimaan uudestaan, mikäli käsitelty materiaali siirretään huoneen lämpöön ja se pääsee kuivahtamaan. Lisäksi käsittelyaine B vaikuttaisi olevan uudelleen muokattavissa ja tiivistettävissä kahden kuukauden sisällä tehtyjen uudelleentivistyskokeiden perusteella. Uudelleentivistyskokeissa samalla materiaalilla tehdyn kolmannen tiivistyksen jälkeen tehdyssä TS-kokeessa materiaaliin ei edelleenkään imeytynyt vettä.

Käsittelyaine B:n suurimmat varmistamista vaativat asiat ovat sen kulutuskestävyys ja pinnan liukkaus/kitka päällystämättömänä sekä käsittelyaineen vaikutuksen pysyvyys käsitellyssä materiaalissa. Hyvin tiivistettynä käsittelyaineella B käsitelty materiaali muodostaa kulutusta kestävä pinnan, mutta tiiviyssaste voi vaikuttaa kestävyysasteen suhteellisen paljon. Kulutuskestävyydestä ja pinnan kitkasta saataneen käsitys tulevaisuudessa uusien koekohteiden seurannasta. Myös käsitellyn pinnan tasaamisesta tai karhentamisesta sekä näiden toimenpiteiden vaikutuksista tien toimivuuteen olisi saatava lisätietoa päällystämättä jäävistä koekohteista.

Kun muutaman vuoden kuluttua ensimmäiset käsittelyaineella B rakennetut koekohteet ovat yli viiden vuoden ikäisiä ja uudemmissa koekohteista saataneen muutaman vuoden seurannan tiedot käyttöön, ollaan tilanteessa, jossa käsittelyaineelle B olisi laadittava ohjeistus sen laajamittaisemman käyttöön oton mahdollistamiseksi.

Käsittelyaine C on hyvä vaihtoehto käsittelyaineelle B. Käsittelyaineet B ja C ovat hinnaltaan samaa suuruusluokkaa. Käsittelyaineella C käsitelty materiaali vaikuttaa kestävä paremmin kulutusta, mutta uudelleen muokkauksessa tai tiivistyksessä sen ominaisuudet ei palaudu samalla tavalla kuin käsittelyaineella B. Käsittelyaine C on ympäristöystävällisempi kuin käsittelyaine B nykyisessä muodossaan. Käsittelyaine C ei ole toisaalta toiminut ihan kaikkien testattujen materiaalien kanssa riittävän hyvin kosteustilaherkkyyden vähentämisessä ja se on herkempi käsittelyn jälkeiselle lämpötilalle kuin

käsittelyaine B. Suurin käsittelyaineen C käyttöönottoa tai kokeilemista haittaava tekijä lieneekin käsittelyaineen B laajempi soveltuvuusalue.

Käsittelyaine A ei toiminut laboratorio-olosuhteissa niin hyvin kuin odotettiin. Erityisesti routanousukokeissa se ei estänyt riittävästi routanousun muodostumista. Toisaalta eri tavalla tiivistetyissä kolmiakksiaalikoenäytteissä se esti erinomaisesti routanousut ja oli vuodenaikaisvaihtelua simuloivien syklisten kolmiakksiaalikoekiden perusteella tehokkain vertailuista käsittelyaineista. Voikin olla, että käsittelyaineen tiivistyksen yhteydessä käsittelyaineen jauhemaisten aineiden on rikkouduttava, jotta lentotuhkan pinnalla olevat polymeerit vaikuttaisivat tehokkaasti ja sammutettu kalkki reagoisi tehokkaammin käsiteltävän materiaalin aktiivisten pintojen kanssa. Suurin este käsittelyaineen A käytölle lienee kuitenkin siinä olevasta lentotuhkasta liukenevat ainesosat, jotka aiheuttavat toksisuustestien perusteella haittaa vesikirpulle, levän kasvulle ja valonbakteerille. Lisäksi käsittelyaine A on kalliimpaa lähinnä erittäin pitkän kuljetusmatkan nostaessa sen hintaa. Käsittelyaineen A tutkimuksia ei ole järkevää jatkaa laajassa mittakaavassa, mikäli käsittelyaineen A kustannukset eivät tule edullisemmiksi ja siitä liukenevien aineiden haittoja ei saada pienennettyä.

Uusien käsittelyaineiden laajamittainen käyttöön ottaminen vaatii kuitenkin vielä tutkimusta ja työkokemuksia useammasta koekohteesta seurantamittauksineen. Erityisesti päällystämättä jätettäviä soratietä olisi valittava koekohteiksi. Koekohteiden teon yhteydessä olisi tehtävä riittävän laajat laboratoriotutkimukset, jotta laboratoriokoetuloksien ja koekohteiden kokemusten välille saadaan riittävästi aineistoa varmistamaan ennakkokokeiden kriteerejä. Laatuvaatimuksien ja niille jälkikäteen tehtävien luotettavien määritysmenetelmien kehittäminen yhdessä käsittelyainevalmistajien kanssa olisi erittäin tärkeää, koska käytettävät käsittelyainemäärät ovat pieniä. Käytönoton loppuvaiheessa käsittelyaineen valmistajan olisi myös modifioitava käsittelyaine toimimaan optimaalisella tavalla tieympäristön erikoispiirteet huomioon ottaen.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lähes kolmivuotinen Väkäste2-projekti onnistui vähintään odotetusti tavoitteissaan. Lupaaviksi arvioitujen kolmen käsittelyaineen sekoittaminen kosteustilaherkkiin kantavan kerroksen materiaaleihin paransi käsiteltyjen materiaalien ominaisuuksia laboratorio-olosuhteissa pääsääntöisesti erinomaisesti. Kahden koekohteen kolmen vuoden seurantamittauksista ei kuitenkaan vielä saatu selkeitä yksikäsitteisiä johtopäätöksiä. Projektin tutkimukset tehtiin alunperin suunnitellulla tavalla. Samalla luotiin ohjeistus, jonka avulla ongelmallisten materiaalien kosteustilaherkkyyden vähentämiseen käytettävien uusien käsittelyaineiden kokeileminen on selkeää ja siten helpompaa.

Laboratoriotutkimusten perusteella käsittelyaine B soveltuu tutkituista käsittelyaineista parhaiten hydrofobisuuden antamiseen käsiteltäville tierakennusmateriaaleille. Muutaman vuoden kuluttua uusista koekohteista saatavien kokemusten jälkeen käsittelyaineen B kohdalla ollaan todennäköisesti tilanteessa, jossa on mahdollista laatia ohjeistus käsittelyaineen B käyttämisestä muiden rakenteen parantamismenetelmien vaihtoehtona.

Käsittelyaine C on hyvä vaihtoehto käsittelyaineelle B. Se ei kuitenkaan estänyt ihan jokaisen materiaalin routanousua. Sitä ei ole vielä kokeiltu yhdessäkään koekohteessa. Jos käsittelyaineella C tehtäisiin muutama koekohde, ja jos niistä saatavat kokemukset olisivat myönteisiä, käsittelyaine C voisi tulla laajempaan käyttöön reilun viiden vuoden kuluttua.

Käsittelyaine A ei ole yhtä hyvä vaihtoehto verrattuna käsittelyaineisiin B ja C, koska siitä liukeni ympäristölle haitallisia aineita hieman liikaa. Käsittelyaine A ei myöskään estänyt routanousuja yhtä tehokkaasti ja lisäksi se on kalliimpi kuin käsittelyaineet B ja C.

Elinkaarianalyysin perusteella käsittelyaineet B ja C vaikuttaisivat olevan erittäin kilpailukykyisiä sorateiden rakenteenparantamismenetelmänä rakenteen jäädessä päällystämättä sekä kilpailukykyisiä päällystettävillä rakenteenparantamiskohteilla verrattuna muihin tyypillisesti käytettäviin rakenteen parantamismenetelmiin. Niiden laajempi käyttöönotto vaatisi useiden koekohteiden rakentamista erityisesti sorateina ja koekohteiden säännöllistä seurantaa. Lisäksi yhdessä käsittelyainevalmistajien kanssa olisi kehitettävä luotettavat menetelmät, joilla voidaan jälkikäteen selvittää käytetyt käsittelyainemäärät.

8 VIITTEET

AASHTO T 294-92 I. (1992). Interim method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils – SHRP protocol P46. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Aho, Saara. 2004. Sorateiden kelirikkokorjausten toimivuus ja elinkaarikustannukset. Tampereen teknillinen yliopisto, Pohja- ja maarakenteet, julkaisu 58. 227 s. + liitt. 28 s.

ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering) Technical Committee on Frost, TC-8. 1989. Work report 1985-1989. VTT Symposium 94 Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, Finland, 13.-15.3.1989. Espoo, VTT. Vol 1.

Kalliainen, Antti. 2008. Uusien käsittelyaineiden vaikutus kosteustilaherkkien tierakennusmateriaalien mekaanisiin ominaisuuksiin. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet. Diplomityö, 106 s. + liitt. 44 s.

Kuusisto, Hanna. 2004. Vähäliikenteisten teiden hoidon, ylläpidon ja korjausinvestointien kustannukset. Tiehallinnon selvityksiä 5/2004. 26 s. + liitt. 1 s.

Luomala, H., Ryyänen, T., Belt, J., Alatyppö, V. & Lampinen, A.. 2008. Tierakenteen käyttöä hallinta uuden teknologian avulla. Loppuraportti. TTY, Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö, tutkimusraportti 74. 162 s. + liitt. 2 s.

Matintupa, Annele. 2007. Uusien käsittelyaineiden vaikutus kosteustilaherkkien tierakennusmateriaalien routimiskäyttämiseen. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden laitos. Diplomityö 97 s. + liitt. 33 s.

Petäjä, Sami ja Spoof, Harri. 2001. Päälysrakenteen elinkaarianalyysi. Tien pohja- ja päälysrakenteiden tutkimusohjelma 1994-2001. Menetelmäkuvaus TPPT 20. Espoo. 43 s. + liitt. 2 s.

Raitanen Timo. 2005. Sitomattomien väylärakennemateriaalien uudet käsittelytekniikat. Tampere 2005. TTY, Pohja- ja maarakenteet, julkaisu 57. 129 s. + liitt. 4 s.

Ristilä, Jouko. 2008. Keskustelu 29.1.2008 Väkäste2-projektin johtoryhmän kokouksessa ja kokouksen nro 5 pöytäkirja.

Roadscanners Oy ja TTY, Maa ja pohjarakenteiden laboratorio. 2005. Tierakenteen kuormituskestävyyden parantaminen hydrofobisilla käsittelyaineilla. Loppuraportti 9.12.2005. 13 s. + liitt. 36 s. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/s14/docs/loppuraportti_hydrofobisetaineet.pdf

Saarenketo, Timo. 2000. Tube Suction -test – sitomattomilla murskeilla suoritettujen rengastestien tulokset. Tiehallinnon selvityksiä 20/2000. Rovaniemi 2000. 33s.+liitt. 9 s.

Sorvari, Jaana. 2000. Ympäristökriteerit mineraalisten teollisuusjätteiden käytölle maarakentamisessa. Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristö 421. 119 s. + liitt. 26 s.

Spoof, Harri ja Petäjä, Sami. 2000. Pudotuspainolaitemittaus. TPPT Menetelmäkuvaus, VTT Yhdyskuntatekniikka. 15 s + liitt 1 s.

Syvälä, Riitta. 2007. Tien rakennusmateriaalien kosteusherkkyyttä vähentävien käsittelyaineiden ympäristövaikutukset. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden laitos. Diplomityö 94 s. + liitt. 2 s.

VNA 591/2006. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa

Vuorimies, Nuutti ja Kolisoja, Pauli. 2005. Sitomattomien väylärakennemateriaalien kosteustilaherkkyyttä vähentävät uudet käsittelytekniikat. TTY, Pohja- ja maarakenteet, tutkimusraportti 61. 128 s. + liitt. 15 s.

Vähätalo, Maria. 2005. Soratien pölynsidonta teollisuuden sivutuotteilla. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. 103 s. + liitt. 35 s


Väkäste2-projektin johtoryhmä. 2008. Keskustelut 29.10.2008 Väkäste2-projektin johtoryhmän kokouksessa ja kokouksen nro 6 pöytäkirja.

9 LIITTEET

Liite 1 Käsittelyaineista käytetyt tunnuukset

KÄSITTELYAINEISTA KÄYTETYT TUNNUKSET

Käsittelyaine A = Polyroad PR21L
Käsittelyaine B = Sacocell KN 10/35
Käsittelyaine C = Raiprint 501



ISSN 1459-1553
ISBN 978-952-221-213-9
TIEH 3201133-v